TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE CHICOLOAPAN

Ingeniería en Energías Renovables

Análisis de la eficiencia aerodinámica y la viabilidad de manufactura en palas eólicas de baja potencia.

Tesis profesional

Que para obtener el Grado de

Ingeniera e Ingeniero

en Energías Renovables

P R E S E N T A

González Pérez Patricia Joselin.

Tinoco Morales Roberto Joshua.

Director: Dr. Daniel Hernández Rivera.

Chicoloapan de Juárez, Estado de México a 10 de junio de 2026

Presentación y directorio de los asesores

El presente trabajo realizado bajo de la modalidad de Tesis profesional, titulado Análisis de la eficiencia aerodinámica y la viabilidad de manufactura en palas eólicas de baja potencia y que ha sido realizado por la alumna **González Pérez Patricia Joselin** con matrícula 21020044 y por el alumno **Tinoco Morales Roberto Joshua** con matrícula 21020033 ha sido aprobado al igual que aceptado como requisito para obtener el grado de **Licenciatura** en:

Ingeniería en Energías Renovables

Director: Dr. Daniel Hernández Rivera
Grado y nombre

Revisor: Dr. Francisco De Santiago Varela
Grado y nombre

Revisor: Mtro. Rodolfo Daniel Velázquez Sánchez
Grado y nombre

Agradecimientos

Hay metas que, aunque llevan nuestro nombre, nunca se alcanzan en soledad. Detrás de cada logro existen personas que nos sostienen cuando las fuerzas parecen agotarse, que creen en nosotros incluso cuando comenzamos a dudar y que, sin esperar nada a cambio, entregan una parte de sí mismas para ayudarnos a construir nuestro futuro. Hoy, al llegar al final de esta etapa, quiero dedicar este logro a quienes han dejado una huella imborrable en mi vida.

A mis padres:

A ustedes, que han sido mi primer ejemplo de esfuerzo, amor y perseverancia. No existen palabras suficientes para agradecer todo aquello que han hecho por mí, especialmente esos sacrificios que muchas veces pasaron desapercibidos, esas preocupaciones que guardaron en silencio y todas las ocasiones en las que pusieron mis sueños por delante de sus propias necesidades.

Gracias por enseñarme que las cosas verdaderamente valiosas requieren dedicación, paciencia y valentía. Por cada consejo, por cada llamada de atención que en su momento quizá no comprendí y por cada palabra de aliento que me ayudó a continuar cuando el camino parecía demasiado complicado.

Si hoy estoy aquí, es porque antes hubo dos personas que hicieron todo lo posible para que nunca me faltaran las oportunidades de llegar más lejos. Este logro también es suyo, porque en cada página de este trabajo están presentes su esfuerzo, sus enseñanzas y el amor con el que me han acompañado durante toda mi vida. Ojalá que al verme cumplir esta meta puedan sentir una pequeña parte del orgullo y la admiración que yo siento por ustedes.

A mi hermano:

Por ser parte de mi historia, por los momentos que hemos compartido y por ese vínculo que, a pesar del tiempo, las diferencias y los caminos que cada uno decida recorrer, siempre nos mantendrá unidos.

Quiero que este logro también sea un recordatorio de que ningún sueño es demasiado grande cuando existe la voluntad de luchar por él. Que habrá momentos de incertidumbre, equivocaciones y obstáculos que parecerán imposibles de superar, pero que ninguno de ellos tiene por qué definir hasta dónde podemos llegar.

Gracias por formar parte de mi vida. Deseo que siempre encuentres la fuerza para perseguir aquello que te haga feliz y que nunca olvides que, sin importar hacia dónde nos lleve la vida, siempre tendrás en mí a alguien que estará orgulloso de tus logros y dispuesto a apoyarte.

A mi abuelita:

Por ser una de esas personas que llenan la vida de amor, ternura y enseñanzas que permanecen para siempre. Gracias por cada abrazo, por tus consejos, por tus palabras de aliento y por ese cariño tan sincero que siempre me has brindado. En ti encuentro un ejemplo de fortaleza, paciencia y amor incondicional. Hoy quiero que sepas que este logro también lleva una parte de ti, porque tus enseñanzas y tu presencia han sido fundamentales en mi vida. Deseo que la vida me permita compartir contigo muchos triunfos más y devolverte, aunque sea un poquito, de todo el amor que me has dado.

A mis maestros:

A quienes, durante estos años, dedicaron mucho más que horas de clase a nuestra formación. Gracias por compartir sus conocimientos, experiencias y, sobre todo, por enseñarnos que la educación no consiste únicamente en aprender conceptos, sino también en desarrollar el criterio, la responsabilidad y el carácter necesarios para enfrentar la vida.

Hoy comprendo que detrás de cada enseñanza también existieron esfuerzos que como estudiantes no siempre supimos reconocer. Hubo tiempo dedicado a preparar clases, a corregir nuestros errores, a resolver nuestras dudas y a insistir en nosotros incluso cuando nuestra propia actitud no facilitaba las cosas.

Gracias a quienes fueron pacientes, a quienes nos exigieron dar más de lo que creíamos posible y a quienes encontraron la manera de motivarnos cuando más lo necesitábamos. Con el tiempo, muchas de aquellas palabras que parecían simples consejos terminaron convirtiéndose en lecciones que van mucho más allá de un salón de clases.

Porque un buen maestro no solamente transmite lo que sabe, también deja algo de sí mismo en cada estudiante que pasa por su vida. Y aunque los años transcurran y nuestros caminos tomen direcciones diferentes, siempre habrá enseñanzas y recuerdos que permanecerán con nosotros.

A mis amigos:

A esas personas que llegaron a mi vida casi sin darme cuenta y que, entre clases, trabajos, preocupaciones, risas y experiencias compartidas, terminaron convirtiéndose en una segunda familia.

Gracias por hacer que los días difíciles fueran un poco más ligeros, por las conversaciones interminables, las bromas en los momentos menos esperados y por todas esas experiencias que, sin saberlo, estábamos convirtiendo en recuerdos que algún día extrañaríamos.

Compartimos mucho más que una etapa académica. Nos vimos crecer, equivocarnos, cambiar de opinión, enfrentar problemas y celebrar pequeñas victorias que para nosotros significaban muchísimo. Algunos estuvieron desde el principio y otros llegaron cuando el camino ya había comenzado, pero cada uno encontró la manera de dejar una marca especial en mi historia.

Quizá en el futuro ya no coincidamos todos los días, nuestras responsabilidades sean distintas y la vida nos lleve a lugares lejanos. Sin embargo, siempre guardaré con cariño la fortuna de haberlos conocido y de haber compartido con ustedes una parte tan importante de mi vida.

A todos ustedes, gracias por formar parte de la persona en la que me he convertido. Porque, aunque este logro lleve mi nombre, hay un pedacito de cada uno en él. Y si algo me ha enseñado este camino, es que los sueños se vuelven todavía más valiosos cuando tenemos con quién compartirlos.

Con todo mi cariño, gratitud y admiración, les dedico este logro.

González Pérez Patricia Joselin

Llegar hasta este momento no ha sido fácil, pero tampoco ha sido un camino que haya recorrido solo. Detrás de esta tesis hay años de esfuerzo, desvelos, preocupaciones, momentos difíciles y muchas personas que estuvieron conmigo, incluso cuando las cosas no salían como esperaba. Por eso, antes de cerrar esta etapa de mi vida, quiero agradecer de corazón a quienes me acompañaron y me ayudaron a llegar hasta aquí.

A mis padres, gracias por estar conmigo desde el principio, por apoyarme en mis decisiones y por hacer todo lo posible para que pudiera seguir estudiando y cumplir mis metas. Gracias por sus consejos, por confiar en mí y por no dejar que me rindiera en los momentos en los que las cosas se complicaban. Sé que detrás de este logro también hay muchos esfuerzos y sacrificios de su parte, y eso es algo que nunca voy a olvidar. Esta tesis representa una meta que hoy puedo cumplir, pero también es una forma de agradecerles todo lo que han hecho por mí.

A mis dos hermanas, gracias por formar parte de mi vida y por ser una motivación para seguir adelante. Espero que algún día, cuando les toque enfrentar sus propios retos, recuerden que las cosas importantes requieren tiempo, esfuerzo y paciencia, pero que vale la pena luchar por ellas. Me gustaría que este logro también les recuerde que pueden alcanzar lo que se propongan y que siempre voy a desear lo mejor para ustedes.

A mis abuelos, gracias por el cariño, los consejos y los valores que me han compartido a lo largo de mi vida. Para mí, ustedes son motivo de orgullo y una parte muy importante de la persona que soy. Sus enseñanzas me han acompañado durante este camino y me han recordado la importancia de mantenerme firme, ser agradecido y valorar a las personas que están conmigo.

De manera muy especial, quiero dedicar unas palabras a mi abuelo Beto, quien lamentablemente ya no está aquí para compartir conmigo este momento. Me hubiera gustado mucho que estuviera presente para verme terminar la universidad y poder contarle que finalmente lo logré. Siempre voy a guardar en mi corazón el recuerdo de que estuvo orgulloso de mí y de lo que estaba haciendo. Aunque ya no pueda abrazarlo ni escuchar sus palabras, lo llevo conmigo y me gusta pensar que estaría feliz de

verme cumplir esta meta. Me habría encantado compartir este logro con él, pero su recuerdo seguirá acompañándome en todo lo que haga. Esta parte de mi vida también va por él.

A mis amigos, que con el tiempo se convirtieron en hermanos y en parte de mi familia, gracias por acompañarme durante estos años, por escucharme cuando necesitaba hablar, por darme ánimos cuando estaba cansado y por compartir conmigo tanto los buenos momentos como aquellos en los que las cosas no iban tan bien. La universidad no solamente me dejó conocimientos y experiencias, también me permitió conocer personas que hicieron más llevadero el camino. Gracias por las risas, los consejos, la compañía y por estar presentes en una etapa que siempre voy a recordar con cariño. Me da gusto saber que, además de cumplir una meta académica, me llevo amistades que significan mucho para mí.

Finalmente, agradezco a todas las personas que, de una u otra manera, me ayudaron a llegar hasta aquí. Cada palabra de aliento, cada consejo y cada muestra de apoyo tuvieron un significado especial, incluso en los momentos en los que quizá no me di cuenta.

Hoy termino una etapa que me costó esfuerzo, tiempo y dedicación, pero que también me dejó aprendizajes y recuerdos que llevaré conmigo. Me siento orgulloso de haber llegado hasta aquí, no porque haya sido fácil, sino porque, a pesar de las dificultades, seguí adelante. Este logro lleva una parte de cada persona que creyó en mí, me apoyó y me acompañó durante el camino. Por eso, esta tesis no representa solamente el final de mis estudios universitarios, sino también una forma de agradecer a quienes han sido parte de mi vida y de este sueño.

Tinoco Morales Roberto Joshua.

I. Resumen

La presente investigación tuvo como objetivo analizar el comportamiento aerodinámico, estructural y la viabilidad de manufactura de una pala para un aerogenerador de eje horizontal de 3 kW de potencia nominal objetivo.

Se caracterizó el recurso eólico del área del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan mediante datos meteorológicos de NASA POWER correspondientes al periodo 2016–2025. Posteriormente, se evaluaron cinco perfiles aerodinámicos NACA utilizando XFoil y QBlade, seleccionando una configuración que combina NACA 4424 en la raíz, NACA 4421 en el cuerpo y la punta, y una sección intermedia denominada NACAT.

El dimensionamiento se realizó mediante el método BEM en MATLAB y la geometría tridimensional se desarrolló en SolidWorks. También se evaluó la respuesta estructural mediante ANSYS y se realizó el mecanizado CNC de una geometría aerodinámica en madera, con trayectorias preparadas en CATIA.

Los resultados mostraron una velocidad media del viento de 2.25 m/s a 10 m de altura. En el análisis estructural se registraron una deformación máxima de 104.27 mm y un esfuerzo principal máximo de 24.569 MPa bajo las condiciones simuladas.

Finalmente, el estudio permitió integrar el diseño aerodinámico, la evaluación estructural y la manufactura, proporcionando evidencia favorable sobre la posibilidad de desarrollar y mecanizar la geometría propuesta se prepararon las trayectorias de mecanizado en CATIA y se fabricó mediante CNC una muestra de madera del perfil NACA 4424, destinada a posibles ensayos aerodinámicos posteriores.

Palabras clave: energía eólica, perfiles NACA, método BEM, análisis estructural, mecanizado CNC.

II. Abstract

This research aimed to analyze the aerodynamic and structural performance, as well as the manufacturing feasibility, of a wind turbine blade designed for a horizontal-axis wind turbine with a target rated power of 3 kW.

The wind resource in the area surrounding the Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan was characterized using NASA POWER meteorological data from 2016 to 2025. Five NACA airfoils were subsequently evaluated using XFoil and QBlade. Based on this analysis, a blade configuration was selected, incorporating the NACA 4424 airfoil at the root, the NACA 4421 airfoil along the main body and tip, and an intermediate transition section designated NACAT.

Blade dimensions were determined using the Blade Element Momentum (BEM) method implemented in MATLAB, and the three-dimensional geometry was developed in SolidWorks. Structural behavior was evaluated using ANSYS, while CATIA was used to prepare toolpaths for the CNC machining of an aerodynamic geometry in wood.

The results indicated a mean wind speed of 2.25 m/s at a height of 10 m. The structural analysis yielded a maximum total deformation of 104.27 mm and a maximum principal stress of 24.569 MPa under the simulated loading conditions.

Finally, overall, the study integrated aerodynamic design, structural assessment, and manufacturing processes, providing supporting evidence for the feasibility of developing and machining the proposed geometry machining toolpaths were prepared in CATIA, and a wooden specimen of the NACA 4424 root airfoil was manufactured using CNC machining for potential aerodynamic testing in future research.

Keywords: wind energy, NACA airfoils, Blade Element Momentum method, structural analysis, CNC machining.

Contenido

I. Agradecimientos **3**

II. Resumen **9**

III. Abstract **10**

1. Introducción **15**

2. Antecedentes **17**

3. Marco teórico **23**

3.1 Fundamentos del recurso eólico **23**

3.2 Velocidad media del viento **23**

3.3 Variabilidad, desviación estándar e intensidad de turbulencia **24**

3.4 Variación temporal del viento **25**

3.5 Variación del viento con la altura **25**

3.6 Distribución de Weibull **26**

3.7 Dirección del viento y rosa de los vientos **27**

3.8 Densidad del aire y potencia eólica disponible **27**

3.9 Aerodinámica de perfiles y fuerzas de sustentación y arrastre **28**

3.10 Número de Reynolds **30**

3.11 Ángulo de ataque, velocidad relativa y ángulo de flujo **30**

3.12 Relación de velocidad de punta **32**

3.13 Solidez del rotor **32**

3.14 Teoría del elemento de pala y cantidad de movimiento (BEM) **33**

3.15 Cuerda, torsión y distribución de perfiles **35**

3.16 Coeficiente de potencia, torque y límite de Betz **36**

3.17 Herramientas numéricas para la evaluación aerodinámica **37**

3.18 Perfiles aerodinámicos **38**

3.19 Nomenclatura de un perfil aerodinámico 38

3.20 Clasificación de perfiles aerodinámicos 39

3.21 Perfiles aerodinámicos para aerogeneradores de baja potencia 41

3.22 Características de los perfiles NACA 4424 y NACA 4421 41

4. Planteamiento del problema 43

5. Hipótesis 45

6. Objetivos 46

7. Metodología 47

7.1Caracterización del recurso eólico del sitio de estudio 48

7.1.1Ubicación y características del sitio 48

7.1.2 Fuente y periodo de los datos 49

7.1.3 Procesamiento estadístico 50

7.1.4 Distribución de velocidades y dirección del viento 50

7.1.5 Condiciones meteorológicas y de diseño 51

7.2Evaluación y selección de perfiles aerodinámicos 51

7.2.1Perfiles aerodinámicos considerados 51

7.2.2 Obtención y preparación de coordenadas 53

7.2.3 Condiciones del análisis mediante XFoil y QBlade 54

7.2.4 Criterios de comparación y ponderación 55

7.3 Dimensionamiento aerodinámico mediante el método BEM 56

7.3.1Determinación y justificación de la velocidad de diseño 58

7.3.2 Procedimiento de dimensionamiento 59

7.4 Construcción tridimensional de la pala 59

7.5 Evaluación estructural mediante elementos finitos 63

7.6 Evaluación del proceso de mecanizado CNC 65

8 Resultados y discusión 68

8.1Caracterización del recurso eólico. 68

8.1.1Estadísticos descriptivos del viento 68

8.1.2 Variación interanual de la velocidad del viento 70

8.1.3 Comportamiento mensual de la velocidad del viento 70

8.1.4 Variación horaria de la velocidad del viento 71

8.1.5 Distribución de Weibull 72

8.1.6 Dirección predominante del viento 73

8.1.7 Variación de la velocidad del viento con la altura 74

8.1.8 Relación entre el recurso eólico y las condiciones nominales de diseño 75

8.2 Evaluación aerodinámica de los perfiles 76

8.2.1 Comparación de los perfiles candidatos 76

8.2.2 Influencia del número de Reynolds en los perfiles seleccionados 76

8.2.3 Evaluación multicriterio de los perfiles 78

8.2.4 Configuración de perfiles seleccionada 80

8.3 Resultados del dimensionamiento aerodinámico mediante BEM 81

8.4 Geometría tridimensional definitiva 85

8.5 Resultados del análisis estructural. 86

8.5.1 Distribución de deformaciones 87

8.5.2 Distribución de esfuerzos principales 88

8.6 Resultados del proceso de mecanizado CNC 89

8.6.1 Preparación y simulación del mecanizado en CATIA 89

8.6.2 Obtención de la geometría mecanizada 91

8.7 Discusión integral y contraste de la hipótesis 91

8.7.1 Relación entre os resultados y los objetivos específicos 91

8.7.2 Contraste de la hipótesis 92

9 Conclusiones 94

IV. Anexos 99

ANEXO A. Base de datos meteorológicos y resultados complementarios de la caracterización del recurso eólico 99

ANEXO B Coordenadas normalizadas de los perfiles aerodinámicos NACA evaluados 101

ANEXO C. Polares aerodinámicas y resultados de la evaluación multicriterio de perfiles 102

ANEXO D. Parámetros de entrada y resultados del dimensionamiento aerodinámico mediante BEM 102

Figura D.1. Resultados de BEM para el álabe en Excel. 102

ANEXO E. Documentación geométrica del álabe desarrollado en SolidWorks 104

ANEXO F. Simulación del mecanizado y programas de control numérico utilizados en CNC 108

1. Introducción

La energía eólica representa una alternativa para el aprovechamiento de fuentes renovables mediante la transformación de la energía cinética del viento en energía mecánica y eléctrica. En los aerogeneradores de baja potencia, el diseño de las palas influye directamente en el aprovechamiento del recurso, debido a que sus características geométricas determinan la generación de fuerzas aerodinámicas y el comportamiento del rotor [1], [6].

Uno de los principales desafíos en estos sistemas es su funcionamiento bajo velocidades de viento reducidas y números de Reynolds relativamente bajos. Estas condiciones pueden modificar los coeficientes de sustentación y arrastre, por lo que la selección de perfiles, la distribución de cuerda y los ángulos de torsión deben responder a las condiciones de operación previstas [10]–[12].

Además del comportamiento aerodinámico, es necesario considerar la resistencia estructural y las posibilidades de fabricación. Una geometría con características aerodinámicas favorables no garantiza por sí sola una respuesta estructural adecuada ni que pueda reproducirse mediante los procesos de manufactura disponibles [15]–[17].

En este contexto, la presente investigación tiene como objetivo analizar la eficiencia aerodinámica y la viabilidad de manufactura de una pala para un aerogenerador de eje horizontal de 3 kW de potencia nominal objetivo, considerando las condiciones del recurso eólico en el área del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, Estado de México. La propuesta incorpora los perfiles NACA 4424 y NACA 4421, unidos mediante una sección de transición denominada NACAT.

El estudio integra la caracterización del recurso eólico, la evaluación aerodinámica, el dimensionamiento geométrico, el análisis estructural y la manufactura de una geometría en madera mediante CNC. Los resultados permiten examinar las características del diseño bajo las condiciones evaluadas, sin asumir una validación experimental completa del aerogenerador.

Finalmente, el documento presenta los antecedentes y fundamentos teóricos, el planteamiento del problema, la hipótesis, los objetivos, la metodología, los resultados y su discusión, así como las conclusiones y los anexos correspondientes.

2. Antecedentes

Uno de los principales aspectos que se estudian en el diseño de aerogeneradores es la forma de sus palas, debido a que esta influye directamente en el aprovechamiento de la energía del viento. Para desarrollar una pala eólica es necesario considerar su comportamiento aerodinámico y las condiciones en las que va a operar. La forma del perfil, la longitud de cuerda y el ángulo de torsión influyen en las fuerzas que actúan sobre el rotor y, en consecuencia, en su capacidad para transformar la energía del viento en energía mecánica.

Diferentes investigaciones han abordado estas variables mediante métodos de cálculo y simulación que permiten evaluar distintas configuraciones antes de fabricar un prototipo. Entre las herramientas utilizadas se encuentran el método Blade Element Momentum (BEM), los programas de análisis de perfiles aerodinámicos y la dinámica de fluidos computacional (CFD). Estos métodos permiten estudiar diferentes aspectos del diseño, desde el comportamiento de una sección aerodinámica hasta el funcionamiento del rotor completo.

El desarrollo de perfiles aerodinámicos cuenta con una base experimental amplia. Los trabajos asociados con las familias NACA permitieron sistematizar geometrías y datos de sustentación y arrastre que todavía se emplean como referencia en el análisis de perfiles.[1] Sin embargo, utilizar un perfil documentado no implica que sea adecuado para cualquier rotor; su selección debe realizarse para el intervalo de Reynolds, los ángulos de ataque y las restricciones estructurales correspondientes al sistema que se pretende diseñar.

El aprovechamiento eólico en sitios con velocidades moderadas y flujo variable requiere conocer las condiciones del viento. Islam et al. [2] estudiaron el potencial eólico de Kudat y Labuan, en Malasia, utilizando la distribución de Weibull para analizar la frecuencia de diferentes velocidades. Durante el periodo estudiado, los autores encontraron diferencias entre ambos sitios y reportaron una densidad máxima de potencia de 67.40 W/m² en Kudat durante 2008. Su investigación muestra la utilidad

de los métodos estadísticos para conocer las características del recurso antes de seleccionar un sistema de aprovechamiento.

Este antecedente resulta importante para la presente investigación porque permite relacionar las condiciones del viento con los parámetros utilizados en el diseño de las palas. Por otra parte, Bianchini et al. [3] estudiaron el modelado y los sistemas de control de aerogeneradores, considerando la relación entre las características del rotor y su comportamiento durante la operación. Su trabajo permite comprender que el funcionamiento de una turbina no depende únicamente de la geometría de sus palas, sino también de la manera en que los diferentes componentes del sistema responden a las condiciones del viento.

En México, Vidal Herrera [4] realizó una investigación sobre la evaluación del recurso eólico en la Universidad Tecnológica de Ciudad Juárez. En su trabajo estudió las características del viento mediante registros meteorológicos, el análisis de velocidades, la dirección predominante y la distribución de Weibull. Esta investigación es relevante porque muestra cómo puede estudiarse el recurso eólico en una institución educativa, tomando en cuenta las condiciones particulares del sitio y la información necesaria para evaluar su aprovechamiento.

La evaluación aerodinámica también puede realizarse mediante distintos métodos numéricos. La dinámica de fluidos computacional (CFD) permite resolver las ecuaciones que describen el movimiento del fluido y analizar variables como los campos de presión y velocidad. Versteeg y Malalasekera [5] presentan los fundamentos de este método, incluyendo las condiciones de frontera, la discretización y los modelos de turbulencia. Su trabajo constituye una referencia para comprender el funcionamiento de estas simulaciones y las condiciones necesarias para obtener resultados confiables.

La precisión de los resultados numéricos depende de aspectos como la calidad del mallado, las condiciones de frontera y los criterios de convergencia. En el análisis aerodinámico, la comparación de los coeficientes de sustentación y arrastre permite estudiar el comportamiento de diferentes perfiles [6] . Sin embargo, cada herramienta

proporciona información distinta, por lo que es importante seleccionar el método de análisis según las variables que se necesitan evaluar.

El desempeño de los sistemas eólicos también depende de las características del emplazamiento. Ayodele et al. [7] estudiaron la selección de sitios para el desarrollo de parques eólicos en Nigeria, considerando información sobre el recurso disponible y factores ambientales, sociales y económicos. Aunque su investigación se enfoca en instalaciones de mayor escala, muestra la importancia de conocer las condiciones de cada lugar antes de desarrollar un proyecto eólico.

Asimismo, las investigaciones recientes han incorporado variables ambientales en la optimización de perfiles aerodinámicos. Yang et al. [8] analizaron la optimización de un perfil de pala considerando incertidumbre en parámetros ambientales bajo condiciones de escarcha. La investigación muestra la utilidad de formular el diseño aerodinámico como un problema sujeto a condiciones de operación definidas, en lugar de seleccionar la geometría únicamente por valores nominales aislados.

En aerogeneradores de baja potencia, el número de Reynolds es una variable importante porque influye en el comportamiento del flujo alrededor de las palas. Kajiwara y Anyoji [9] estudiaron experimentalmente los efectos de la intensidad de turbulencia sobre una burbuja de separación en un ala de placa plana, utilizando números de Reynolds entre 20 000 y 60 000. Sus resultados permiten comprender cómo la turbulencia puede modificar la separación y la readhesión del flujo. Este fenómeno debe considerarse al estudiar perfiles que operan a números de Reynolds bajos, aunque las condiciones de su experimento no son iguales a las utilizadas en la presente investigación.

Richmond-Navarro et al. [10] realizaron una revisión de perfiles aerodinámicos utilizados en turbinas eólicas de eje horizontal y pequeña escala, principalmente para zonas con bajo potencial eólico y presencia de turbulencia. Los autores identificaron perfiles como SG6043, S809 y NACA 0012, y compararon su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación. El estudio señala que la selección de un perfil debe considerar no solamente la relación entre coeficiente de sustentación y arrastre,

sino también su respuesta ante cambios en el número de Reynolds y la rugosidad superficial. Esta investigación es útil para comprender por qué el comportamiento de un perfil debe evaluarse de acuerdo con las condiciones previstas para el rotor.

Ganiele et al. [11] estudiaron ocho perfiles aerodinámicos para el diseño de un aerogenerador de eje horizontal de aproximadamente 1 kW. Para ello utilizaron QBlade y SolidWorks Flow Simulation, comparando los coeficientes de sustentación y arrastre a diferentes ángulos de ataque. Entre los perfiles estudiados se encuentra el NACA 4412, que pertenece a la misma familia de cuatro dígitos que los perfiles considerados en la presente investigación. Este trabajo muestra cómo pueden utilizarse herramientas numéricas para comparar diferentes geometrías antes de seleccionar una sección aerodinámica.

Por su parte, Rehman et al. [12] revisaron diferentes metodologías para mejorar el diseño y la eficiencia de las palas de aerogeneradores de eje horizontal. En su investigación se consideran métodos analíticos, numéricos y experimentales, así como aspectos aerodinámicos y geométricos. Esta revisión permite comprender que el diseño de una pala requiere estudiar diferentes variables y que la selección de un perfil es solamente una parte del proceso.

Vidal Pavón [13] desarrolló una investigación sobre el diseño de aspas para aerogeneradores de baja potencia con regulación por pérdida aerodinámica. Su trabajo incluyó el estudio de perfiles, la aplicación del método BEM para dimensionar el aspa y ensayos en túnel de viento para analizar el comportamiento del perfil S822. Este antecedente resulta importante porque muestra una aplicación del método BEM en el diseño de aspas pequeñas y permite relacionar las características aerodinámicas del perfil con el comportamiento previsto del rotor.

Los métodos de cálculo de menor demanda computacional permiten comparar diferentes perfiles y establecer dimensiones iniciales del rotor. Por otra parte, los modelos tridimensionales pueden utilizarse para estudiar aspectos que no se representan completamente mediante modelos simplificados. Dependiendo del tipo de análisis, estas herramientas permiten evaluar el flujo alrededor de una geometría o

estudiar su respuesta estructural ante determinadas cargas [14] . Hansen [6] y Manwell et al. [1] presentan los fundamentos aerodinámicos necesarios para comprender estas etapas y su relación con el diseño de palas eólicas. Sus aportaciones sirven como fundamento para el uso del método BEM y el análisis de las características del rotor.

Además del comportamiento aerodinámico, es necesario considerar la geometría de cada región de la pala. Cerca de la raíz se requieren secciones capaces de transmitir las cargas hacia el buje, mientras que en las regiones exteriores cobra mayor importancia el comportamiento aerodinámico. Esto explica por qué algunos diseños utilizan diferentes perfiles a lo largo de su longitud y realizan transiciones entre ellos, buscando mantener la continuidad de la geometría.

Fuster Carrascosa [15] estudió la influencia del diseño geométrico y de los materiales sobre el comportamiento estructural de los álabes de un aerogenerador de baja potencia. La investigación utilizó el perfil NACA 4412 y desarrolló diferentes configuraciones mediante ANSYS Workbench, considerando cargas asociadas a la presión del viento, la rotación y la gravedad. El estudio también comparó distintas combinaciones de materiales para evaluar la respuesta de la estructura. Este antecedente es relevante porque permite comprender la importancia de analizar las deformaciones y los esfuerzos de una pala, además de considerar únicamente su comportamiento aerodinámico.

En una investigación realizada en México, Gómez et al.[16] desarrollaron una metodología para diseñar y fabricar palas de baja potencia utilizando herramientas CAD/CAM y materiales compuestos. El trabajo consideró un aerogenerador de 600 W, con palas de 75.5 cm de longitud. Los autores utilizaron un centro de mecanizado CNC de tres ejes para elaborar modelos de madera y posteriormente fabricar componentes en fibra de vidrio. Este antecedente resulta de especial interés porque demuestra la aplicación de herramientas de diseño y mecanizado en el desarrollo de geometrías para palas eólicas.

Más recientemente, Quesada-Bedoya et al. [17] estudiaron diferentes alternativas de materiales y procesos de fabricación para palas de aerogeneradores pequeños. En su investigación consideraron aspectos como el tiempo de fabricación, los costos, la disponibilidad de maquinaria, la repetibilidad del proceso y la capacidad para producir superficies complejas. Los autores muestran que la selección del proceso de manufactura no depende únicamente de la forma de la pieza, sino también de los recursos y las condiciones disponibles para fabricarla.

Las investigaciones enfocadas en aerogeneradores de baja potencia coinciden en la importancia del diseño de una pala desde diferentes aspectos. Con base en lo anterior se establecieron los parámetros de seleccionar perfiles adecuados para las condiciones de operación. Cuya finalidad es probar, las investigaciones estructurales y de manufactura que muestran que también es necesario evaluar la resistencia de la geometría y las posibilidades de fabricación.

3. Marco teórico

3.1 Fundamentos del recurso eólico

El viento se origina por diferencias de presión asociadas con el calentamiento desigual de la superficie terrestre y con la dinámica atmosférica. A escala local, su comportamiento también está condicionado por la rugosidad del terreno, la topografía, la estabilidad atmosférica y la presencia de obstáculos. Debido a esta variabilidad, la evaluación de un emplazamiento no debe basarse en un único registro o en una velocidad aislada; requiere una serie suficientemente extensa y un tratamiento estadístico que permita reconocer tendencias, dispersión y frecuencia de ocurrencia. [1], [18]

En los aerogeneradores de baja potencia, conocer las condiciones del viento es importante porque el rotor puede trabajar durante periodos prolongados a velocidades reducidas. Por esta razón, el análisis del recurso eólico permite identificar las condiciones en las que se espera que opere el aerogenerador y establecer algunos de los parámetros necesarios para comenzar su diseño.

3.2 Velocidad media del viento

La velocidad media resume el nivel promedio del viento durante un periodo determinado. Se obtiene a partir de las observaciones válidas de la serie y permite comparar años, meses, horas o alturas bajo un mismo criterio. No obstante, su interpretación debe acompañarse de medidas de dispersión, ya que dos series con la misma media pueden presentar distribuciones y potenciales energéticos diferentes. [1]

$$V_{\mathrm{m}} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} Vi \tag{3.1}$$

Ecuación (3.1). Velocidad media del viento.

V_m = velocidad media del viento (m/s).

V_i = velocidad registrada en la observación i (m/s).

n = número total de observaciones válidas (adimensional).

i=índice que indica cada observación (adimensional).

Esta ecuación permite obtener una velocidad representativa del periodo analizado. Sin embargo, la velocidad media no muestra por sí sola todas las variaciones del viento, por ello se complementa con otras medidas estadísticas. Esto es importante al evaluar aerogeneradores pequeños, ya que la energía disponible depende de las velocidades que se presentan a lo largo del tiempo y no solamente de su promedio.[14]

3.3 Variabilidad, desviación estándar e intensidad de turbulencia

La desviación estándar cuantifica la dispersión de los registros respecto de la media. Un valor pequeño indica mayor concentración alrededor del promedio; un valor elevado señala una serie más variable. Para una muestra se utiliza el denominador n−1, con lo que se obtiene el estimador muestral de la desviación estándar.

$$s_V = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(V_i - V_m)^2} \tag{3.2}$$

Ecuación (3.2). Desviación estándar muestral de la velocidad del viento.

Sv=Desviación estándar muestral de las velocidades (m/s).

n=número de observaciones.

V_i = velocidad registrada en la observación i (m/s).

Vm = velocidad media (m/s).

La desviación estándar no equivale por sí sola a intensidad de turbulencia. Esta última se define, para un intervalo de análisis determinado, como la desviación estándar de las fluctuaciones normalizada por la velocidad media del mismo intervalo. [1], [18]

$$I_T = \frac{\sigma_u}{\overline{U}} \tag{3.3}$$

Ecuación (3.3). Intensidad de turbulencia.

IT = intensidad de turbulencia (adimensional).

σu=Desviación estándar de las fluctuaciones longitudinales de velocidad (m/s).

$\overline{U}$ = desviación estándar de la componente de velocidad considerada (m/s).

La desviación estándar y la intensidad de turbulencia permiten estudiar distintos aspectos de la variabilidad del viento. La primera describe la dispersión de los valores registrados, mientras que la segunda relaciona las fluctuaciones de velocidad con su valor medio dentro de un intervalo definido. Para calcular la intensidad de turbulencia es necesario utilizar registros adecuados a la escala temporal que se desea estudiar, ya que no es equivalente analizar las variaciones del viento a lo largo de varios meses que estudiar sus fluctuaciones durante periodos cortos.

3.4 Variación temporal del viento

El viento presenta cambios en escalas interanuales, estacionales, mensuales y diarias. El análisis interanual permite identificar si el promedio de un periodo largo está dominado por años atípicos; el análisis mensual revela la estacionalidad; y el perfil horario ayuda a reconocer ciclos asociados con el calentamiento y enfriamiento de la superficie. Esta separación temporal es importante porque la disponibilidad del recurso y la producción del aerogenerador no permanecen constantes durante el año. [14], [1]

Estas variaciones también deben considerarse al estimar la energía que puede producir un aerogenerador, debido a que la potencia disponible cambia de manera importante con la velocidad del viento.

3.5 Variación del viento con la altura

Dentro de la capa límite atmosférica, la velocidad tiende a aumentar con la altura al disminuir la influencia directa de la fricción superficial. Una aproximación frecuente para trasladar una velocidad conocida desde una altura de referencia hasta otra altura es la ley potencial. El exponente depende de la rugosidad y de las condiciones atmosféricas; por ello, no debe adoptarse sin justificarlo para el emplazamiento. [1], [18]

$$V_2 = V_1 \left(\frac{z_2}{z_1}\right)^{\alpha_\omega}$$

(3.4)

Ecuación (3.4). Ley potencial para la variación vertical de la velocidad.

V_1=velocidad a la altura de referencia (m/s).

V_2 = velocidad estimada a la nueva altura (m/s).

α = exponente de cizalladura del viento, adimensional.

Z_1=altura de referencia (m).

Z_2 = altura de evaluación (m).

α_w= Exponente de cizalladura del viento (adimensional).

El exponente de cizalladura puede variar dependiendo de las características del terreno y de las condiciones atmosféricas. Por ello, cuando se utiliza esta expresión para estimar la velocidad a una altura diferente, es necesario indicar el valor del exponente y justificar el criterio empleado para seleccionarlo.

3.6 Distribución de Weibull

La distribución de Weibull de dos parámetros se utiliza ampliamente para representar la frecuencia de ocurrencia de las velocidades del viento. El parámetro de forma k controla la dispersión y la geometría de la distribución, mientras que el parámetro de escala c se relaciona con el nivel característico de las velocidades. Su empleo resulta útil para resumir series extensas, aunque el ajuste debe contrastarse con el histograma observado antes de utilizarlo en cálculos energéticos. [1], [18]

$$f(V) = \frac{k}{c}\left(\frac{V}{c}\right)^{\mathrm{k}-1} e^{-(V/c)^k}$$

(3.5)

Ecuación (3.5). Función de densidad de probabilidad de Weibull.

$f(V)$ = densidad de probabilidad de la velocidad (s/m).

V=velocidad de viento (m/s).

k = parámetro de forma (adimensional).

c = parámetro de escala (m/s).

e=base de logaritmo natural (adimensional).

Condiciones: $V \geq 0, k > 0 \; y \; c > 0$

Para utilizar esta distribución es necesario determinar los parámetros de forma y escala a partir de los datos disponibles. Islam et al. [2] emplearon este método para evaluar el potencial eólico de Kudat y Labuan, en Malasia. Su investigación permite observar cómo una distribución estadística puede utilizarse para describir la frecuencia de las velocidades del viento y estimar las condiciones del recurso en un lugar determinado.

3.7 Dirección del viento y rosa de los vientos

La interpretación de una rosa de los vientos depende de los datos utilizados para elaborarla. Cuando se construye a partir de mediciones locales, representa las condiciones registradas en el punto de observación. En cambio, cuando se utilizan datos de reanálisis atmosférico, los resultados describen las características del viento representadas por el modelo, por lo que pueden existir diferencias respecto a las condiciones específicas del sitio. [1], [4]

3.8 Densidad del aire y potencia eólica disponible

La densidad del aire depende principalmente de la presión y la temperatura y modifica de manera directa la energía disponible en el flujo. Para aire seco y dentro del intervalo habitual de condiciones atmosféricas, puede aproximarse mediante la ecuación de estado del gas ideal. [1]

$$\rho = \frac{p}{R_a T} \tag{3.6}$$

Ecuación (3.6). Densidad del aire a partir de presión y temperatura.

ρ = densidad del aire (kg/m³).

p = presión absoluta (Pa).

Ra = constante específica del aire seco, aproximadamente 287.05 (J/(kg·K)).

T = temperatura absoluta (K).

La potencia cinética que atraviesa el área barrida por el rotor aumenta con el cubo de la velocidad. Esta relación explica por qué no es correcto estimar la energía disponible sustituyendo toda una distribución de viento por una sola velocidad media. [1]

$$P_v = \frac{1}{2} \rho A V^3 \tag{3.7}$$

Ecuación (3.7). Potencia disponible en el viento.

Pv = potencia disponible del viento (W).

ρ = densidad del aire (kg/m³).

A = área barrida por el rotor, m².

V=velocidad del viento no perturbado (m/s).

La potencia disponible en el viento representa la energía que atraviesa el área del rotor por unidad de tiempo, pero no equivale a la potencia que puede obtenerse del aerogenerador. La cantidad de energía aprovechada depende del desempeño aerodinámico del rotor y de las pérdidas presentes en el sistema. Además, debido a que la velocidad aparece elevada al cubo, los cambios en esta variable tienen una influencia importante sobre la potencia disponible.[6]

3.9 Aerodinámica de perfiles y fuerzas de sustentación y arrastre

La pala de un aerogenerador se compone de secciones aerodinámicas que producen sustentación y arrastre cuando son atravesadas por el flujo relativo. Para comparar perfiles y trasladar los resultados entre escalas se emplean coeficientes adimensionales. La sustentación actúa perpendicularmente a la velocidad relativa, mientras que el arrastre actúa en su misma dirección.

$$C_l = \frac{L'}{\frac{12}{\rho} V_{rel}^2 c} \tag{3.8}$$

Ecuación (3.8). Coeficiente de sustentación.

$$C_d = \frac{D'}{\frac{12}{\rho} V_{rel}^2 c}$$

(3.9)

Ecuación (3.9). Coeficiente de arrastre.

CL = coeficiente de sustentación (adimensional).

CD = coeficiente de arrastre (adimensional).

L'=Sustentación por unidad de envergadura (N/m).

D'=Arrastre por unidad de envergadura (N/m).

ρ = densidad del aire (kg/m³).

V_{rel}=velocidad relativa del aire sobre el perfil (m/s).

c=longitud de cuerda (m).

Los coeficientes aerodinámicos permiten comparar el comportamiento de diferentes perfiles bajo determinadas condiciones de flujo. En el análisis bidimensional, las fuerzas de sustentación y arrastre se expresan por unidad de envergadura y se relacionan con la cuerda del perfil.

La relación entre los coeficientes de sustentación y arrastre ecuación 3.10 es uno de los parámetros utilizados para evaluar el comportamiento aerodinámico de una sección. Sin embargo, un valor elevado de esta relación no garantiza por sí solo que el rotor completo tenga un mejor desempeño, debido a que también intervienen la distribución de cuerda, la torsión, el número de Reynolds y las condiciones de operación. [1], [6],

$$\frac{C_l}{Cd}$$

(3.10)

Ecuación (3.10). Relación entre el Coeficiente de sustentación y de arrastre.

CL = coeficiente de sustentación (adimensional).

CD = coeficiente de arrastre (adimensional).

3.10 Número de Reynolds

El número de Reynolds relaciona los efectos de inercia y viscosidad presentes en el flujo de aire alrededor de un perfil. Su valor depende de la velocidad relativa del aire, la longitud de cuerda y las propiedades del fluido, por lo que puede variar entre las distintas secciones de una misma pala.

En los aerogeneradores de baja potencia, las dimensiones relativamente pequeñas de los perfiles pueden producir condiciones de Reynolds bajos. Richmond-Navarro et al. [10] analizaron el comportamiento de diferentes perfiles empleados en turbinas eólicas pequeñas y señalaron la importancia de considerar las variaciones del número de Reynolds durante su evaluación aerodinámica.

Por otra parte, Ganiele et al. [11] realizaron una comparación de ocho perfiles para el diseño de un aerogenerador de aproximadamente 1 kW, utilizando herramientas numéricas para estudiar sus características aerodinámicas. Estos trabajos permiten comprender la importancia de evaluar los perfiles dentro de las condiciones de operación previstas para el rotor.

$$Re = \frac{\rho\, V_{\mathrm{rel}}\, c}{\mu} = \frac{V_{\mathrm{rel}}\, c}{\nu} \tag{3.11}$$

Ecuación (3.11). Número de Reynolds de una sección de pala.

Re=Numero de Reynolds (adimensional).

ρ = densidad del aire (kg/m³).

V_{rel}=velocidad relativa del aire sobre el perfil (m/s).

c = cuerda del perfil (m).

μ = viscosidad dinámica del aire (Pa·s).

ν = viscosidad cinemática del aire (m²/s).

3.11 Ángulo de ataque, velocidad relativa y ángulo de flujo

Una sección de pala en rotación recibe la combinación del viento axial y de la velocidad tangencial asociada con el giro. En BEM, ambas componentes se modifican mediante los factores de inducción axial y tangencial. La magnitud de la velocidad relativa

determina, junto con la cuerda, el Reynolds local; su dirección define el ángulo de flujo. [1], [18]

$$V_{\text{rel}} = \sqrt{(V(1-a))^2 + (\Omega r(1+a'))^2} \tag{3.12}$$

Ecuación (3.12). Velocidad relativa sobre un elemento de pala.

$$\varphi = tan^{-1}\left(\frac{V(1-a)}{\Omega r(1+a')}\right) \tag{3.13}$$

Ecuación (3.13). Ángulo del flujo relativo.

V_{rel}=magnitud de la velocidad relativa (m/s).

V=velocidad del viento libre (m/s).

a = factor de inducción axial (adimensional).

a' = factor de inducción tangencial (adimensional).

Ω = velocidad angular del rotor (rad/s).

r = posición radial de la sección (m).

φ=ángulo del flujo relativo (° o rad)

La velocidad relativa que recibe cada sección depende de la velocidad del viento, la rotación del rotor y los factores de inducción. Como la velocidad tangencial cambia con la distancia al eje, las condiciones de flujo también cambian a lo largo de la pala.

El ángulo de flujo permite conocer la dirección de la velocidad relativa y se utiliza junto con el ángulo de ataque para establecer la orientación geométrica de cada sección. En la implementación del método BEM es importante mantener una misma convención de signos para los factores de inducción y los ángulos utilizados. [1], [6], [19]

El ángulo de ataque α es la diferencia entre la dirección del flujo relativo y la orientación geométrica de la cuerda. Esta relación permite definir la torsión necesaria para que las distintas secciones trabajen cerca del intervalo aerodinámico seleccionado.

$$\beta = \varphi - \alpha \tag{3.14}$$

Ecuación (3.14). Relación entre torsión geométrica, ángulo de flujo y ángulo de ataque.

β=ángulo geométrico total de orientación de la sección.

φ=ángulo del flujo relativo.

α=ángulo de ataque aerodinámico.

3.12 Relación de velocidad de punta

La relación de velocidad de punta o tip-speed ratio (TSR) compara la velocidad tangencial de la punta con la velocidad del viento no perturbado. Constituye una variable central para describir el estado de operación del rotor y para establecer una condición nominal de diseño. [1], [13]

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V} \quad (3.15)$$

Ecuación (3.15). Relación de velocidad de punta del rotor.

λ = relación de velocidad de punta TSR (adimensional).

R = radio del rotor (m).

Ω = velocidad angular del rotor (rad/s).

V = velocidad del viento no perturbado (m/s).

La relación de velocidad de punta permite conocer la velocidad con la que gira el extremo de una pala en comparación con la velocidad del viento. Este parámetro es importante durante el dimensionamiento del rotor porque influye en la distribución de los ángulos de flujo y en las condiciones aerodinámicas de cada sección.

El valor utilizado durante el diseño debe relacionarse con las características del aerogenerador y las condiciones de operación seleccionadas. [6],[19]

3.13 Solidez del rotor

La solidez local relaciona el número de palas y la longitud de cuerda con la posición radial en la que se realiza el análisis. Este parámetro permite representar la distribución geométrica de las secciones del rotor y participa en las ecuaciones utilizadas para calcular los factores de inducción mediante el método BEM.

Debido a que la cuerda puede cambiar a lo largo de la pala, la solidez local también puede presentar valores diferentes entre la raíz y la región exterior. [1], [6], [19]

$$\sigma(r) = \frac{B\, c\,(r)}{2\pi r} \tag{3.16}$$

Ecuación (3.16). Solidez local del rotor.

$\sigma(r)$=solidez local (adimensional).

B = número de palas del rotor (adimensional).

$C(r)$=cuerda correspondiente a la estación radial (m).

r=Distancia de la estación al centro del rotor (m).

3.14 Teoría del elemento de pala y cantidad de movimiento (BEM)

El método Blade Element Momentum combina dos descripciones del rotor. La teoría de cantidad de movimiento estudia el cambio de momento lineal y angular de la corriente de aire; la teoría del elemento de pala calcula las fuerzas a partir de la geometría local y de las polares aerodinámicas. La compatibilidad entre ambas formulaciones permite obtener los factores de inducción y las cargas de cada elemento.

La pala se divide radialmente en elementos. Para cada posición se estiman las condiciones de flujo, se determina el ángulo de ataque, se consultan CL y CD para el Reynolds correspondiente y se actualizan los factores de inducción. El procedimiento se repite hasta alcanzar convergencia. Las cargas elementales se integran posteriormente para obtener torque, empuje y potencia del rotor. En un rotor real suelen incorporarse correcciones por pérdidas de punta y raíz y tratamientos para estados de inducción elevada. [1], [6], [19]

Para utilizar el método BEM es necesario contar con información aerodinámica de los perfiles que forman la pala. Esta información se obtiene mediante las curvas de sustentación y arrastre para diferentes ángulos de ataque y números de Reynolds. A partir de estos datos, el método permite calcular las fuerzas que actúan sobre cada elemento radial y estimar el comportamiento del rotor.

La precisión de los resultados depende de las polares utilizadas, las condiciones de operación y las hipótesis del modelo. Durante el procedimiento iterativo es necesario establecer un criterio de convergencia para los factores de inducción y considerar las correcciones correspondientes a las pérdidas aerodinámicas, cuando estas se incluyan en el análisis. [1], [6]

En el método BEM, la pala se divide en diferentes elementos radiales para calcular las condiciones de flujo y las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre cada sección. El procedimiento utiliza la geometría del rotor y los coeficientes de sustentación y arrastre correspondientes a los perfiles seleccionados. A partir de estos datos se estiman los factores de inducción y se repite el cálculo hasta alcanzar un criterio de convergencia.

Gerardo Vidal Pavón [13] aplicó esta metodología al diseño de aspas de baja potencia con regulación por pérdida aerodinámica. Su investigación muestra cómo pueden relacionarse las propiedades de los perfiles con el dimensionamiento geométrico del rotor. Sin embargo, los resultados obtenidos mediante BEM dependen de las hipótesis del modelo y de las correcciones consideradas para representar las pérdidas y el comportamiento del flujo.

$$c_n = c_l \cos\varphi + c_d \sin\varphi \tag{3.17}$$

Ecuación (3.17). Coeficiente de fuerza normal al plano del rotor

$$c_t = c_l \sin\varphi - c_d \cos\varphi \tag{3.18}$$

Ecuación (3.18). Coeficiente de fuerza tangencial al movimiento del rotor

cn= Coeficiente de fuerza normal al plano del rotor (adimensional).

ct = Coeficiente de fuerza tangencial al movimiento del rotor (adimensional).

CL = coeficiente de sustentación (adimensional).

CD = coeficiente de arrastre (adimensional).

φ=ángulo del flujo relativo (° o rad)

Las fuerzas de sustentación y arrastre pueden descomponerse en componentes normal y tangencial respecto al plano de rotación. La componente normal contribuye al empuje que soporta el rotor, mientras que la componente tangencial produce el torque asociado con el aprovechamiento de la energía del viento.

Al calcular estas fuerzas en las distintas estaciones radiales y posteriormente integrarlas, es posible estimar el empuje y el torque del rotor. Estos resultados dependen de la geometría de cada sección, las condiciones del flujo y los coeficientes aerodinámicos utilizados. [1], [6]

3.15 Cuerda, torsión y distribución de perfiles

La cuerda y la torsión son dos características importantes en el diseño de una pala eólica. La longitud de cuerda influye en las fuerzas aerodinámicas que se generan en cada sección, mientras que la torsión permite orientar los perfiles de acuerdo con los cambios del ángulo de flujo a lo largo del radio.

En la región cercana a la raíz también deben considerarse las exigencias estructurales, debido a que las cargas se transmiten hacia el buje. Por esta razón, algunos diseños utilizan perfiles de diferente espesor según la posición que ocupan en la pala. [6],[1]

La distribución geométrica obtenida mediante BEM puede ajustarse para facilitar la construcción del modelo tridimensional o su fabricación. Sin embargo, estos cambios deben evaluarse posteriormente para conocer si afectan el comportamiento aerodinámico originalmente estimado.

La geometría teórica obtenida mediante BEM puede suavizarse o linealizarse para facilitar el modelado y la manufactura. La simplificación debe verificarse posteriormente, porque una geometría más sencilla de fabricar no garantiza que se conserve el desempeño aerodinámico original.

3.16 Coeficiente de potencia, torque y límite de Betz

El coeficiente de potencia representa la fracción de la potencia cinética disponible que el rotor transforma en potencia mecánica. Para el rotor ideal descrito por la teoría unidimensional de cantidad de movimiento, el límite de Betz establece un máximo teórico de 16/27, aproximadamente 0.593. Los rotores reales operan por debajo de este límite debido a pérdidas aerodinámicas, rotación de la estela, número finito de palas y otras irreversibilidades. [1]

$$C_{\mathrm{p}} = \frac{P_{\mathrm{rotor}}}{\frac{1}{2}\,\rho\,A\,V^{3}} \tag{3.19}$$

Ecuación (3.19). Coeficiente de potencia del rotor.

Cp=Coeficiente de potencia del rotor (adimensional).

Protor=Potencia mecánica extraída por el rotor (W).

ρ = densidad del aire (kg/m³).

A=Área barrida por las palas (m²).

V=Velocidad del viento libre (m/s).

La potencia mecánica también puede expresarse mediante el producto del torque por la velocidad angular. Esta relación es fundamental al analizar el acoplamiento con el generador, porque la compatibilidad debe comprobarse simultáneamente en potencia, velocidad de giro y torque.

$$P_{\mathrm{mec}} = Q\,\Omega \tag{3.20}$$

Ecuación (3.20). Relación entre potencia mecánica, torque y velocidad angular.

Pmec = potencia mecánica en el eje (W).

Q = torque del rotor (N·m).

Ω = velocidad angular del rotor (rad/s).

El coeficiente de potencia permite comparar la potencia mecánica obtenida por el rotor con la potencia disponible en el viento. El límite de Betz establece un valor máximo

teórico de aproximadamente 0.593 para un rotor ideal bajo las hipótesis de la teoría de cantidad de movimiento unidimensional.

En un aerogenerador real, el coeficiente de potencia es menor debido a diferentes pérdidas aerodinámicas. Además, la potencia eléctrica disponible después del generador depende de las pérdidas mecánicas y eléctricas del sistema, por lo que no debe confundirse con la potencia aerodinámica estimada mediante BEM.[1], [6]

3.17 Herramientas numéricas para la evaluación aerodinámica

El diseño de una pala eólica puede estudiarse mediante distintas herramientas, dependiendo de la información que se desea obtener. XFoil permite analizar perfiles aerodinámicos bidimensionales y estimar sus coeficientes de sustentación y arrastre bajo condiciones definidas de número de Reynolds y ángulo de ataque.[15]

Los resultados de los perfiles pueden utilizarse como información de entrada para el método BEM, que permite estudiar el comportamiento del rotor mediante el análisis de sus diferentes secciones. Este método puede implementarse en MATLAB para resolver las ecuaciones del modelo y calcular variables relacionadas con las cargas, el torque y la potencia.[1],[19]

Por otra parte, los programas de diseño asistido por computadora permiten construir modelos tridimensionales de la geometría calculada. Estos modelos pueden emplearse posteriormente en programas de análisis por elementos finitos para evaluar la respuesta estructural ante determinadas condiciones de carga.

Las herramientas utilizadas en estas etapas proporcionan información diferente y deben interpretarse de acuerdo con sus hipótesis y limitaciones. El análisis aerodinámico de un perfil, el cálculo del rotor y la evaluación estructural de una pala no representan el mismo problema físico, aunque forman parte de un mismo proceso de diseño. [6]

3.18 Perfiles aerodinámicos

El diseño aerodinámico de las palas es uno de los aspectos que influyen en el aprovechamiento de la energía del viento. Su geometría determina cómo interactúa el aire con cada sección del álabe y cómo se generan las fuerzas necesarias para producir el movimiento del rotor. Por esta razón, la selección de los perfiles aerodinámicos debe considerar tanto las condiciones de operación como las características geométricas de la pala. [6]

Un perfil aerodinámico corresponde a la sección transversal de una superficie diseñada para interactuar con un flujo de aire. Cuando existe movimiento relativo entre el aire y el perfil se producen fuerzas de sustentación y arrastre, cuya magnitud depende de la geometría, el ángulo de ataque y las condiciones del flujo. En los aerogeneradores de eje horizontal, la componente de estas fuerzas que actúa en dirección tangencial contribuye a generar el torque del rotor. [1], [6], [19]

El comportamiento aerodinámico de un perfil suele evaluarse mediante los coeficientes de sustentación y arrastre. La relación entre ambos permite comparar distintas geometrías bajo condiciones de operación definidas. Sin embargo, seleccionar un perfil con una relación sustentación-arrastre elevada no garantiza por sí solo un mayor rendimiento del aerogenerador, ya que también influyen la distribución de cuerda, la torsión y las condiciones de funcionamiento de las distintas secciones de la pala. [1], [6]

3.19 Nomenclatura de un perfil aerodinámico

Para describir la geometría de un perfil aerodinámico se utilizan diferentes elementos que permiten identificar sus dimensiones y características principales. Entre ellos se encuentran el borde de ataque, el borde de salida, la línea de cuerda, la línea de comba media y el espesor. Estos parámetros se emplean tanto para representar la geometría como para estudiar su comportamiento frente al flujo de aire.

El borde de ataque corresponde a la región delantera del perfil, mientras que el borde de salida se encuentra en el extremo posterior. La línea de cuerda es la recta que une

ambos extremos, y su longitud, representada por (c), se utiliza como referencia para definir las dimensiones del perfil.

La línea de comba media describe la curvatura de la sección a partir de los puntos medios entre sus superficies superior e inferior. Por su parte, la comba representa la distancia entre esta línea y la cuerda, mientras que el espesor corresponde a la separación entre ambas superficies según la convención geométrica utilizada.

Otro parámetro importante es el ángulo de ataque, representado por (α), que se define como el ángulo entre la línea de cuerda y la dirección del viento relativo. Su valor influye en los coeficientes de sustentación y arrastre y, por consecuencia, en las fuerzas que actúan sobre el perfil.[1], [14]

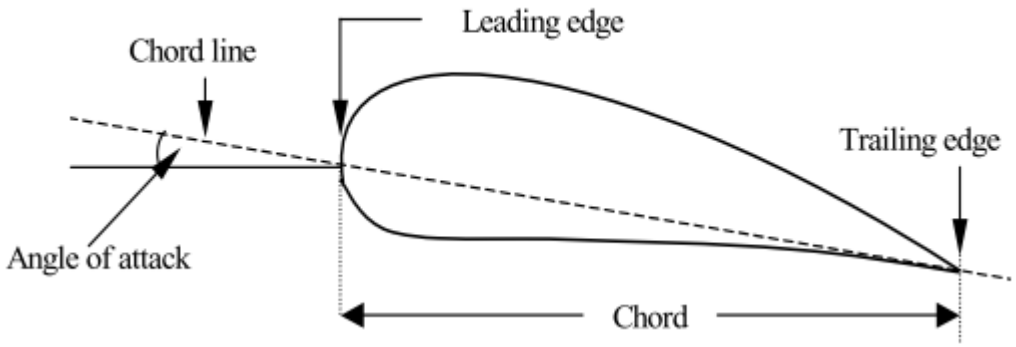


Figura 1: Nomenclatura básica de un perfil aerodinámico. Fuente: Mathew [14], fig. 2.11, p. 24.]

3.20 Clasificación de perfiles aerodinámicos

A lo largo del desarrollo de la aerodinámica se han estudiado diferentes familias de perfiles con características geométricas particulares. Entre las más conocidas se encuentran las desarrolladas por el National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), cuya nomenclatura permite identificar parámetros como la curvatura y el espesor relativo. Esta clasificación facilita la descripción y comparación de las geometrías utilizadas en aplicaciones aeronáuticas y eólicas.[14]

En la familia NACA de cuatro dígitos, el primer número representa la curvatura máxima como porcentaje de la cuerda, mientras que el segundo indica la posición de esa

curvatura en décimas de cuerda. Los dos últimos números corresponden al espesor máximo relativo expresado en porcentaje. Esta forma de identificar los perfiles permite conocer algunas características de su geometría sin necesidad de disponer inicialmente de todas sus coordenadas. [14]

Además de los perfiles NACA, se han desarrollado otras familias adaptadas a diferentes aplicaciones y condiciones de operación. Richmond-Navarro et al. [10] realizaron una revisión de perfiles utilizados en turbinas eólicas de eje horizontal y pequeña escala. Entre los perfiles estudiados destacan SG6043, S809 y NACA 0012, cuyos comportamientos aerodinámicos presentan diferencias dependiendo del número de Reynolds y de las condiciones del flujo.

Por otra parte, Ganiele et al.[11] estudiaron ocho perfiles aerodinámicos para un micro aerogenerador de aproximadamente 1 kW: NACA 0012, NACA 4412, NREL S822, NREL S823, NREL S833, Clark Y, SD7080 y Wortmann FX 63-137, se observa en la Figura 2. Los autores utilizaron herramientas numéricas para comparar sus características aerodinámicas y estudiar su posible aplicación en un rotor de baja potencia.

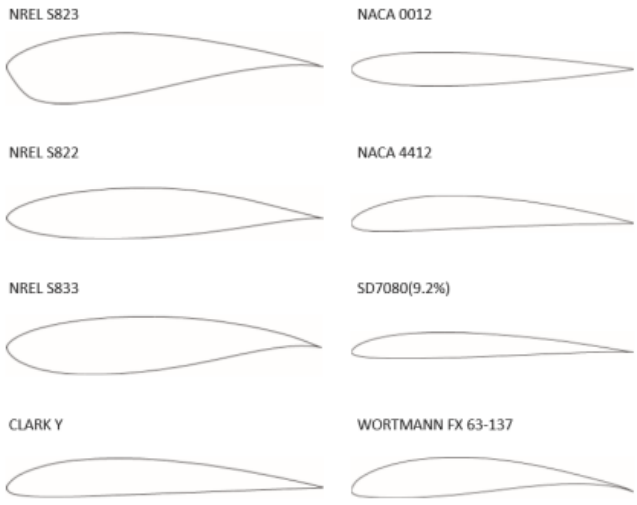


Figura 2: Perfiles aerodinámicos seleccionados por Ganiele et al. Fuente: Ganiele et al. [11], fig. 4, p. 41.]

3.21 Perfiles aerodinámicos para aerogeneradores de baja potencia

En los aerogeneradores de baja potencia, la selección del perfil debe considerar las condiciones de viento y el tamaño del rotor, debido a que estos factores influyen en el número de Reynolds al que trabaja cada sección. En condiciones de Reynolds bajos, la capa límite puede presentar cambios en su comportamiento y fenómenos de separación que afectan los coeficientes de sustentación y arrastre. [10]

Richmond-Navarro et al. [10] señalaron la importancia de estudiar los perfiles para las condiciones de operación previstas, especialmente cuando existe bajo potencial eólico o una intensidad de turbulencia elevada. Su revisión muestra que los perfiles no presentan el mismo comportamiento bajo todas las condiciones y que la selección debe apoyarse en información aerodinámica correspondiente al intervalo de Reynolds de interés.

En el estudio de Ganiele et al. [11] se empleó QBlade para analizar los coeficientes aerodinámicos de los perfiles seleccionados a un número de Reynolds de aproximadamente 109 007, considerando diferentes ángulos de ataque. Los autores también utilizaron SolidWorks Flow Simulation para comparar los resultados numéricos.

Estas investigaciones muestran la utilidad de evaluar diferentes perfiles mediante herramientas de simulación antes de seleccionar una geometría para el rotor. Sin embargo, los resultados obtenidos para una configuración determinada no deben trasladarse directamente a otra sin considerar las diferencias de Reynolds, dimensiones y condiciones de operación.

3.22 Características de los perfiles NACA 4424 y NACA 4421

Los perfiles NACA 4424 y NACA 4421 pertenecen a la familia NACA de cuatro dígitos. Ambos presentan una curvatura máxima nominal del 4 % de la cuerda, ubicada al 40 % de su longitud, mientras que su espesor máximo relativo corresponde al 24 % y al 21 %, respectivamente. Esta diferencia permite disponer de secciones con distintos espesores conservando la misma distribución nominal de curvatura. [14]

El espesor de un perfil es una característica importante en el diseño de una pala porque influye tanto en su comportamiento aerodinámico como en el espacio disponible para desarrollar su estructura. En la región cercana a la raíz, donde deben transmitirse las cargas hacia el buje, las secciones de mayor espesor pueden ofrecer ventajas geométricas para el diseño estructural. Sin embargo, la resistencia final depende del material, la geometría tridimensional y las condiciones de carga. [1], [6], [20]

En la presente investigación se seleccionó el perfil NACA 4424 para la región de raíz, mientras que el NACA 4421 se utilizó en el cuerpo y la región exterior del álabe. Entre ambas geometrías se incorporó un perfil intermedio, denominado NACAT, para establecer la transición entre las secciones.

Esta configuración se estudió mediante herramientas de análisis aerodinámico y modelado tridimensional, con el propósito de relacionar las características de los perfiles con la geometría de la pala. La transición entre las secciones se desarrollará con mayor detalle en el siguiente apartado, donde se explicarán los criterios geométricos utilizados para construirla.

4. Planteamiento del problema

El aprovechamiento de la energía eólica mediante aerogeneradores de baja potencia presenta dificultades relacionadas con las condiciones del viento y el diseño de sus componentes. A diferencia de los aerogeneradores de mayor escala, los sistemas pequeños pueden operar con velocidades de viento reducidas y números de Reynolds relativamente bajos, condiciones que influyen en el comportamiento aerodinámico de las palas. En estos casos, las características de los perfiles utilizados, así como la distribución de cuerda y torsión, adquieren especial importancia para favorecer la extracción de energía del flujo. Richmond-Navarro et al. [10] y Ganiele et al. [11] señalan la necesidad de evaluar los perfiles aerodinámicos considerando las condiciones de operación para las que serán utilizados.

Una de las principales dificultades en el diseño de palas eólicas de baja potencia consiste en seleccionar una configuración geométrica que responda a las características del viento disponible. La utilización de perfiles que no correspondan a las condiciones de funcionamiento previstas puede ocasionar un aumento del arrastre o una reducción de la sustentación, afectando la capacidad del rotor para aprovechar la energía del viento. Asimismo, la variación de las condiciones aerodinámicas entre la raíz y la punta de la pala hace necesario considerar las diferencias de funcionamiento entre sus distintas secciones [1], [6]

Esta problemática adquiere relevancia cuando se pretende desarrollar un aerogenerador para un emplazamiento específico, debido a que las características del recurso eólico pueden diferir de las condiciones nominales consideradas durante el diseño. En el caso del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, Estado de México, se plantea el estudio de una pala destinada a un aerogenerador de eje horizontal con una potencia nominal objetivo de 3 kW. El problema radica en establecer una geometría adecuada para las condiciones de operación consideradas, sin asumir que el cumplimiento de una condición nominal representa necesariamente un desempeño equivalente bajo las velocidades de viento que se presentan en el sitio.

Además de las condiciones aerodinámicas, el diseño de una pala requiere considerar su comportamiento estructural. Durante la operación, los álabes están sometidos a cargas que producen esfuerzos y deformaciones, cuya magnitud depende de la geometría, las propiedades del material y las condiciones de funcionamiento. Por esta razón, una configuración que presente características aerodinámicas favorables no necesariamente garantiza un comportamiento estructural adecuado. La relación entre estos aspectos constituye una dificultad adicional, particularmente en las regiones cercanas a la raíz, donde se transmiten las cargas hacia el buje [12], [15].

La fabricación representa otro aspecto que condiciona la aplicación de un diseño. Las variaciones geométricas entre las diferentes secciones de la pala pueden dificultar su reproducción física, especialmente cuando se dispone de recursos limitados para trabajar superficies complejas. Por ello, no basta con definir una geometría desde el punto de vista aerodinámico; también es necesario considerar si sus características pueden reproducirse mediante los procesos y equipos de manufactura disponibles. Gómez et al. [16] y Quesada-Bedoya et al. [17] muestran la importancia de relacionar el diseño de palas de baja potencia con las características de los materiales y las posibilidades de fabricación.

En este contexto, la problemática de la investigación consiste en la necesidad de relacionar el comportamiento aerodinámico de los perfiles, la distribución geométrica de la pala, su respuesta estructural y las posibilidades de manufactura dentro de una misma propuesta de diseño. La dificultad principal no se limita a seleccionar un perfil con buenos coeficientes aerodinámicos, sino a determinar si una combinación de secciones puede ofrecer características favorables para su aplicación en un rotor de baja potencia, considerando también las exigencias estructurales y las restricciones de fabricación.

5. Hipótesis

La utilización de perfiles aerodinámicos diferenciados en las regiones de raíz, transición y cuerpo de una pala eólica permitirá desarrollar una geometría para un aerogenerador de eje horizontal de 3 kW de potencia nominal objetivo, cuyo comportamiento pueda evaluarse mediante los coeficientes aerodinámicos, el coeficiente de potencia, la potencia mecánica y el torque bajo las condiciones de operación establecidas.

Asimismo, se espera que esta configuración presente una respuesta estructural dentro de los límites definidos para el modelo de fibra de vidrio utilizado en ANSYS y que la geometría del perfil seleccionado pueda reproducirse mediante mecanizado CNC en madera, bajo las condiciones del proceso evaluado.

6. Objetivos

6.1. General

Diseñar y evaluar una pala para un aerogenerador de eje horizontal de 3 kW de potencia nominal objetivo, mediante el análisis de perfiles aerodinámicos, el dimensionamiento basado en BEM y la evaluación estructural por elementos finitos, considerando además la posibilidad de reproducir una sección de su geometría mediante mecanizado CNC.

6.2. Específicos

- Caracterizar el recurso eólico del sitio de estudio para establecer las condiciones de operación utilizadas en el diseño del aerogenerador.
- Evaluar y seleccionar los perfiles aerodinámicos mediante XFoil, considerando los coeficientes de sustentación y arrastre, su relación y el intervalo de números de Reynolds establecido.
- Dimensionar la geometría de la pala mediante el método BEM implementado en MATLAB, definiendo la distribución radial de perfiles, cuerda y torsión.
- Desarrollar el modelo tridimensional de la pala en SolidWorks, incorporando los perfiles NACA 4424 y NACA 4421 y su geometría de transición.
- Evaluar la respuesta estructural de la pala mediante el método de elementos finitos en ANSYS, utilizando las propiedades del material de fibra de vidrio seleccionado y las condiciones de carga establecidas.
- Evaluar la posibilidad de manufactura de un perfil aerodinámico mediante la preparación del modelo de mecanizado y su fabricación en madera utilizando CNC.

7. Metodología

La presente investigación se desarrolló mediante seis etapas como se observa en el Diagrama 1, estas etapas están relacionadas con el diseño, análisis y fabricación de una pala para un aerogenerador de eje horizontal de 3 kW de potencia nominal objetivo. Cada etapa permitió obtener información necesaria para continuar con la siguiente, desde la caracterización del viento hasta la evaluación de la geometría mediante mecanizado CNC.

Primero se analizaron las condiciones del recurso eólico del sitio de estudio. Posteriormente, se evaluaron diferentes perfiles aerodinámicos mediante XFoil, considerando sus coeficientes de sustentación y arrastre. Con esta información se realizó el dimensionamiento de la pala mediante el método BEM implementado en MATLAB, definiendo la distribución de cuerda, torsión y perfiles a lo largo del radio.

A partir de los parámetros obtenidos se construyó el modelo tridimensional en SolidWorks, incorporando los perfiles NACA 4424, NACA 4421 y una sección intermedia de transición. Después se realizó un análisis estructural mediante elementos finitos en ANSYS, utilizando un material predeterminado de fibra de vidrio y las condiciones de carga establecidas para la simulación.

Finalmente, se preparó y ejecutó el mecanizado CNC de un perfil en madera. Esta etapa se utilizó para evaluar las posibilidades de reproducción física de la geometría bajo las condiciones del equipo disponible. Los resultados de cada procedimiento se analizaron considerando sus propias limitaciones, sin asumir que las simulaciones o el mecanizado de una muestra representan una validación experimental de la pala completa.

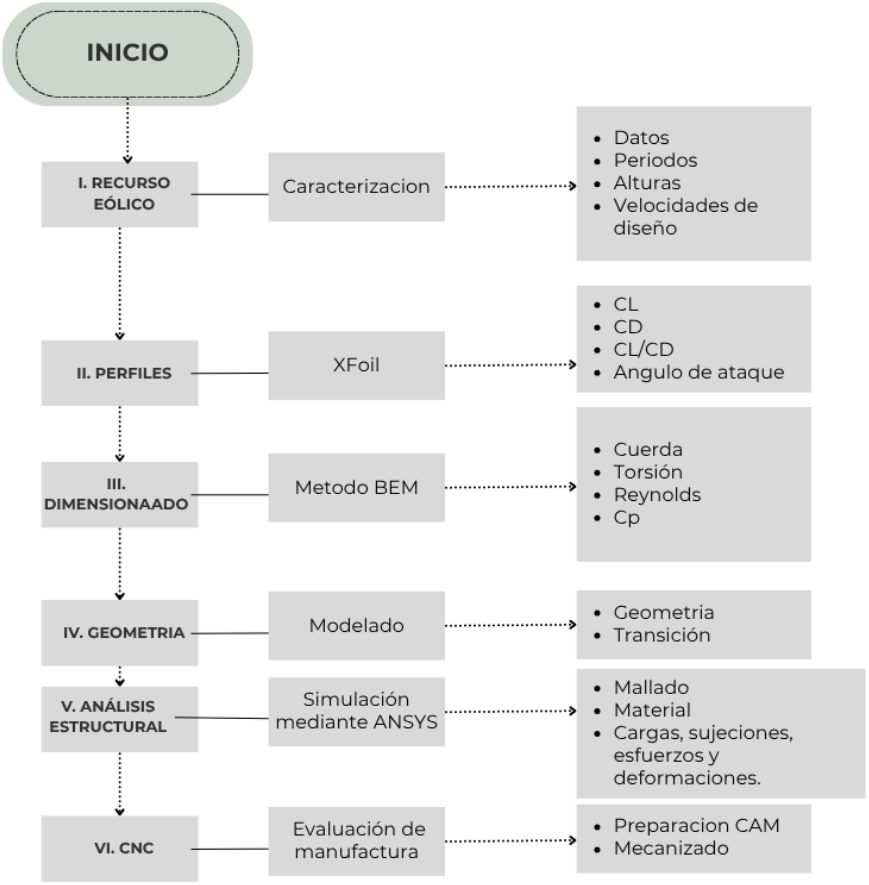


Diagrama 1: Proceso metodológico. Fuente propia.

7.1 Caracterización del recurso eólico del sitio de estudio

La primera etapa consistió en estudiar las condiciones del viento correspondientes al área del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan. Para ello se utilizó una serie meteorológica histórica con el propósito de conocer el comportamiento del recurso eólico y disponer de información para interpretar las condiciones de operación del aerogenerador.

7.1.1 Ubicación y características del sitio

El sitio de estudio corresponde al Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan, ubicado en Chicoloapan de Juárez, Estado de México. Para identificar su ubicación se utilizaron las coordenadas geográficas 19.410727° de latitud norte y 98.871466° de

longitud oeste. Las características generales del emplazamiento se presentan en la Tabla 1.

El entorno presenta edificaciones y áreas abiertas que pueden influir en las condiciones locales del viento. Por esta razón, se consideraron las características generales del emplazamiento durante la interpretación de los datos meteorológicos.[1], [14]

Tabla 1: Ubicación geográfica y características generales del sitio de estudio.

Parámetro	Valor
Sitio de estudio	Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan
Municipio	Chicoloapan de Juárez
Estado	Estado de México
Latitud	19.410727° N
Longitud	98.871466° O
Altitud	≈ 2 240 m s.n.m.
Periodo analizado	2016–2025

Fuente: elaboración propia a partir de la serie horaria NASA POWER/MERRA-2 utilizada en el proyecto.

7.1.2 Fuente y periodo de los datos

La información se obtuvo mediante el servicio NASA Prediction of Worldwide Energy Resources (POWER), utilizando las variables meteorológicas disponibles para las coordenadas del sitio. Debido a que estos datos provienen de productos atmosféricos con una resolución espacial determinada, se consideraron representativos del área de estudio y no como mediciones realizadas directamente dentro de las instalaciones del Tecnológico. [21]

Teniendo en consideración las condiciones atmosféricas regionales, tomando en cuenta que procede de productos de datos meteorológicos y no de mediciones realizadas directamente en el emplazamiento. [21]

7.1.3 Procesamiento estadístico

Los registros se organizaron de manera cronológica para obtener indicadores descriptivos del viento. Se calcularon la velocidad media, la mediana, la desviación estándar y la velocidad máxima. Posteriormente, la información se agrupó por año, mes y hora para analizar las variaciones temporales del recurso.

Los procedimientos estadísticos se desarrollaron siguiendo los fundamentos de caracterización del recurso eólico descritos por Manwell et al. [1] y Mathew. [14] Para organizar la información se utilizó la fecha y hora de cada registro, lo que permitió agrupar las velocidades por año, mes y hora del día. Con estas agrupaciones se calcularon promedios para identificar las variaciones temporales del recurso. Las expresiones utilizadas corresponden a las ecuaciones estadísticas presentadas en el marco teórico.

7.1.4 Distribución de velocidades y dirección del viento

Para estudiar la frecuencia de las velocidades del viento se utilizó la distribución de Weibull de dos parámetros, aplicada a la serie horaria obtenida mediante NASA POWER. Este modelo permitió representar estadísticamente las velocidades registradas durante el periodo de estudio.

La estimación de los parámetros de forma y escala se realizó a partir de los datos disponibles, siguiendo el procedimiento estadístico empleado en el procesamiento de la serie. La utilización de esta distribución para evaluar el recurso eólico se encuentra documentada en Islam et al. [2] y Vidal Herrera.[4]

También se analizaron los registros de dirección del viento. Para ello, las observaciones se agruparon en sectores direccionales y se calculó su frecuencia de ocurrencia. Con esta información se elaboró una rosa de los vientos para identificar las direcciones predominantes durante el periodo considerado.

Los resultados del ajuste de Weibull y de la distribución direccional se presentan en el capítulo 8, correspondiente a los resultados de la caracterización meteorológica.

Por otra parte, los registros direccionales se agruparon para conocer la frecuencia de ocurrencia de los distintos sectores y elaborar una rosa de los vientos.

7.1.5 Condiciones meteorológicas y de diseño

Los resultados meteorológicos se utilizaron como referencia para interpretar el recurso eólico del área de estudio. Estos valores se mantuvieron diferenciados de las velocidades nominales utilizadas posteriormente en el algoritmo BEM, debido a que corresponden a condiciones de análisis distintas.

Esta diferencia se mantuvo durante el desarrollo de los cálculos para evitar que las condiciones nominales del rotor se interpretaran como velocidades representativas del recurso eólico del emplazamiento. Su comparación se realizará posteriormente en el apartado de resultados.

7.2 Evaluación y selección de perfiles aerodinámicos

7.2.1 Perfiles aerodinámicos considerados

Para iniciar la evaluación aerodinámica se consideraron cinco perfiles de las familias NACA: 0012, 3412, 23012, 4421 y 4424. La selección inicial permitió comparar geometrías con diferentes características de curvatura y espesor relativo. La Tabla 2 presenta las características nominales de los perfiles utilizados como candidatos para el diseño.

Tabla 2: Características geométricas nominales de los perfiles aerodinámicos candidatos.

Perfil/Serie.	Características.
NACA 0012	• **0% de curvatura (camber)** → el perfil es completamente simétrico respecto a la cuerda. • **0% posición de la curvatura máxima** (al no tener curvatura). • **12% de espesor relativo**. • Genera **cero sustentaciones a un ángulo de ataque 0°**. Usado en palas de aerogeneradores de pequeño tamaño, colas de aeronaves y superficies donde se busca estabilidad y facilidad de fabricación.

	Su respuesta aerodinámica es predecible y tiene buen comportamiento en condiciones de inversión de flujo.
NACA 3412	• **3% de camber máximo**. • **Posición del camber máximo al 40% de la cuerda** (0.4c). • **12% de espesor relativo**. • Es un perfil **camber** (curvado), por lo que genera sustentación a 0° de ataque. Presenta mejores coeficientes de sustentación que la serie 00, con un comportamiento de arrastre bajo para Reynolds moderados. Se emplea en diseños de palas y aeronaves de baja velocidad donde se requiere un balance entre sustentación y eficiencia.
NACA 4421	• **4% de camber máximo**. • **Posición del camber al 40% de la cuerda**. • **21% de espesor relativo** → más grueso que los anteriores. • Ofrece **alta capacidad de sustentación** a ángulos bajos debido al mayor camber. • El espesor elevado permite integrar estructuras internas robustas, por lo que se usa en aplicaciones donde se requiere rigidez. • Buen desempeño en sistemas de baja velocidad o turbinas eólicas pequeñas.

NACA 4424	• **4% de camber máximo**.
	• **Posición del camber al 40% de la cuerda**.
	• **24% de espesor relativo**, lo que lo convierte en un perfil muy grueso.
	• Se caracteriza por:
	  • Mayor resistencia estructural.
	  • Aumento del momento de cabeceo por el mayor espesor.
	  • Alta sustentación a bajo ángulo de ataque.
	Usado en palas de turbinas de baja potencia o aplicaciones donde el diseño requiere resistencia, espacio interno o una forma que minimice vibraciones.

NACA 23012	• **2% de camber efectivo**. • **Posición del camber más adelantada**, con curvatura más agresiva. • Más eficiente en la generación de sustentación que los perfiles de 4 dígitos. • **12% de espesor relativo**. El número “30” indica un **coeficiente de sustentación de diseño** de aproximadamente 0.3. • Alta eficiencia aerodinámica. • Mejor comportamiento en pérdidas (stall). • Se usa extensamente en aeronáutica y turbinas eólicas por su buen desempeño a bajos Re.

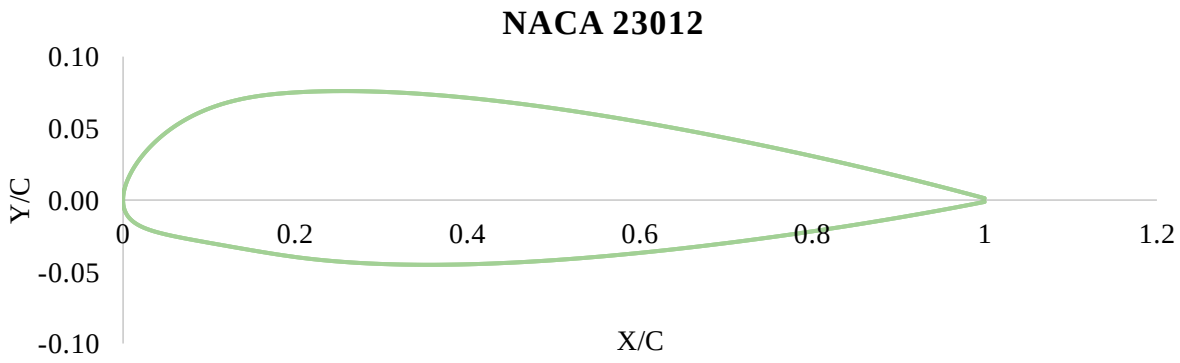
Fuente: Elaboración propia a partir de *Manwell [1]*

7.2.2 Obtención y preparación de coordenadas

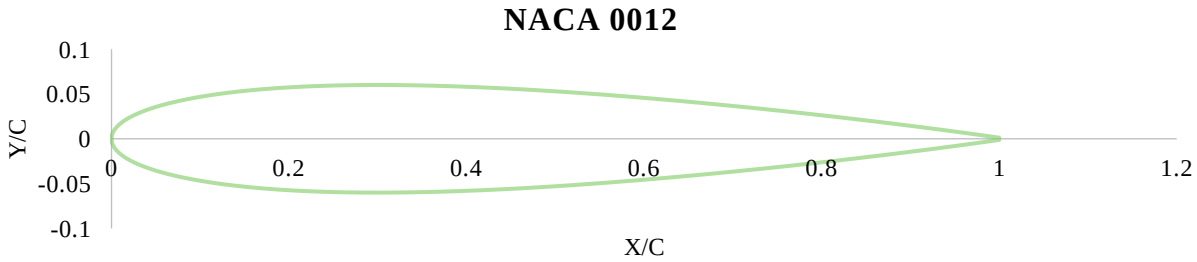
Las geometrías de los perfiles candidatos se obtuvieron mediante QBlade. Para cada perfil se utilizaron 200 puntos de coordenadas que describen el contorno de la sección aerodinámica.

Las coordenadas se organizaron mediante las relaciones normalizadas (x/c) y (y/c), donde (x) representa la posición horizontal, (y) la posición vertical y (c) la longitud de cuerda del perfil. Esta representación permite comparar las geometrías independientemente de sus dimensiones físicas.

Con los puntos obtenidos se elaboraron las gráficas de los cinco perfiles candidatos mediante las herramientas de gráficos de Word se muestran en la Figura 3. Estas representaciones se utilizaron para observar las diferencias geométricas entre las secciones antes de continuar con la evaluación aerodinámica.



a)



b)

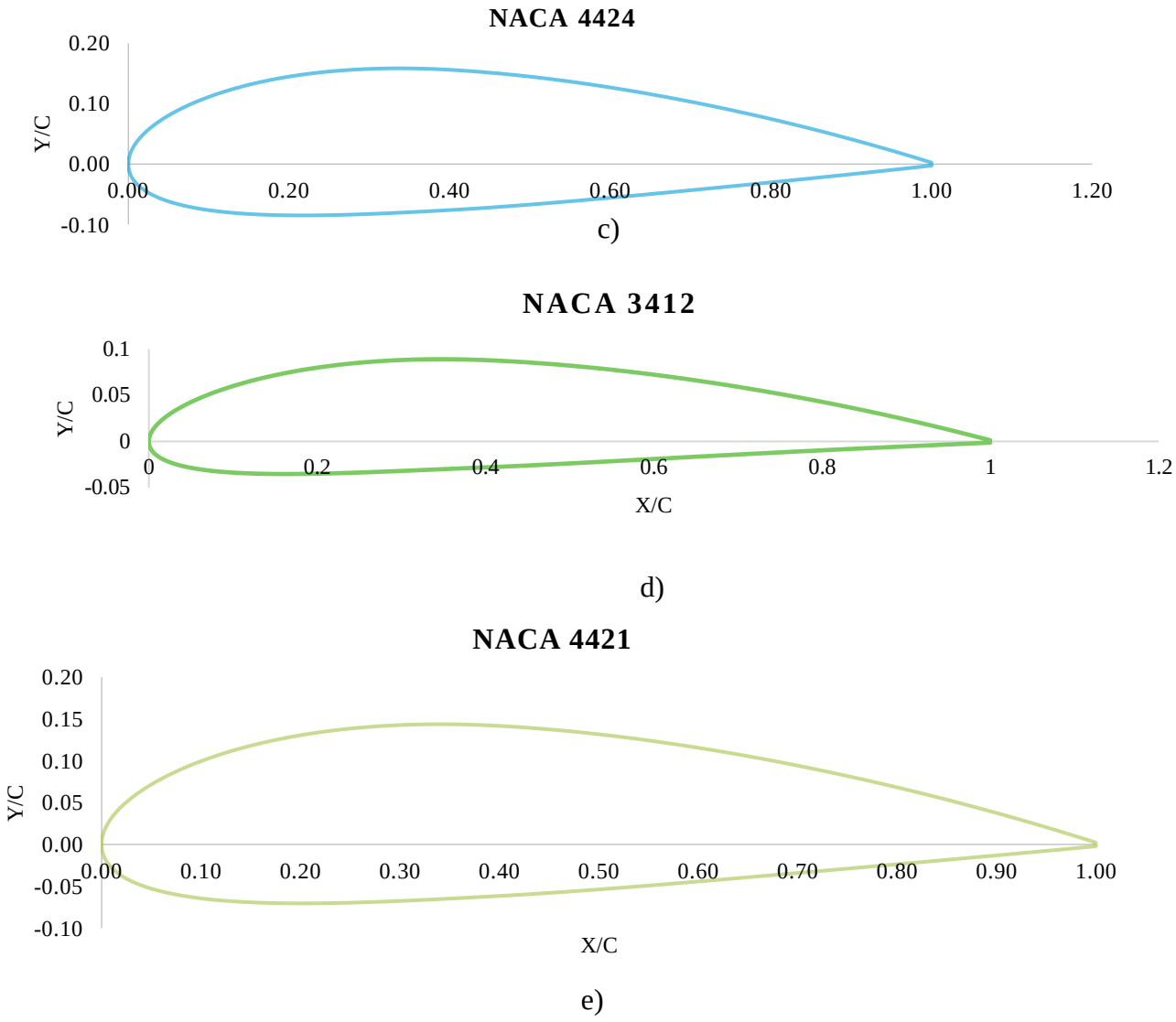


Figura 3: Representación geométrica normalizada de los perfiles NACA considerados para la evaluación aerodinámica. Fuente: elaboración propia a partir de 200 puntos de coordenadas por perfil obtenidos mediante QBlade.

Las coordenadas normalizadas utilizadas para representar los perfiles candidatos se incluyen en el Anexo B, con el propósito de documentar la geometría empleada durante el análisis y facilitar su reproducción.

7.2.3 Condiciones del análisis mediante XFoil y QBlade

Una vez preparadas las geometrías de los perfiles, se realizó su evaluación aerodinámica utilizando las herramientas de análisis disponibles en QBlade, basadas

en XFoil. Se generaron polares aerodinámicas para cinco números de Reynolds: 200 000, 300 000, 400 000, 500 000 y 600 000.

Las condiciones de cálculo consideraron un número de Mach igual a cero y un valor del parámetro de transición de 9. Las posiciones de transición forzada se mantuvieron en $(x/c = 1)$ para las superficies superior e inferior, según la configuración registrada en los archivos exportados.

Las polares disponibles contienen ángulos de ataque comprendidos entre −5° y 20°, con incrementos nominales de un grado. En algunas series no aparecen todos los valores angulares, por lo que las comparaciones se realizaron a partir de los resultados disponibles.

Para cada condición se consideraron los coeficientes de sustentación y arrastre y se calculó su relación (CL/CD). Estos indicadores permitieron comparar el comportamiento de los perfiles bajo diferentes condiciones de Reynolds.

Los fundamentos de la evaluación aerodinámica a números de Reynolds relativamente bajos se encuentran descritos por Richmond-Navarro et al. [10] y Ganiele et al. [11], mientras que los principios aerodinámicos de los coeficientes utilizados se encuentran desarrollados en Hansen.[6]

7.2.4 Criterios de comparación y ponderación

Para complementar el análisis aerodinámico se propuso una matriz de evaluación multicriterio que permitiera comparar las geometrías consideradas durante el diseño. Los criterios seleccionados fueron la relación sustentación-arrastre, el coeficiente máximo de sustentación, el espesor relativo y la facilidad de mecanizado.

A cada criterio se le asignó una ponderación de acuerdo con su importancia dentro del proyecto. La relación sustentación-arrastre recibió un peso del 40 %, mientras que el coeficiente máximo de sustentación y el espesor relativo recibieron un 25 % cada uno. Finalmente, a la facilidad de mecanizado se le asignó el 10 % restante.

La evaluación se organizó mediante una escala de 1 a 5, donde las puntuaciones mayores representan condiciones más favorables dentro de cada criterio. Para los

parámetros aerodinámicos, las calificaciones se determinaron a partir de los resultados obtenidos mediante QBlade, mientras que los aspectos geométricos se valoraron considerando la función prevista de cada perfil dentro del álabe se muestra en la Tabla 3.

La puntuación final se calculó mediante una suma ponderada. Esta evaluación se utilizó como herramienta de apoyo para la selección y no como una demostración de que una geometría presenta el mejor desempeño bajo cualquier condición de operación.

Tabla 3: Criterios de evaluación y ponderación de perfiles aerodinámicos.

Criterio	%	Máximo en escala de 5
Relación cl/cd	**40 %**	**2.00**
Sustentación máxima cl máx.	**25 %**	**1.25**
Espesor relativo según región	**25 %**	**1.25**
Facilidad de mecanizado	**10 %**	**0.50**
Total	**100 %**	**5.00**

Fuente: Elaboración propia.

Durante esta etapa también se utilizó QBlade para la preparación y comparación geométrica de los perfiles. La información obtenida se organizó para su incorporación posterior al procedimiento de dimensionamiento BEM.

La selección consideró las características aerodinámicas y geométricas de cada perfil, prestando atención al espesor relativo en las regiones cercanas a la raíz y al comportamiento aerodinámico de las secciones exteriores. [12]

7.3 Dimensionamiento aerodinámico mediante el método BEM

El dimensionamiento aerodinámico de la pala se desarrolló mediante el método *Blade Element Momentum* (BEM), implementado en MATLAB. Este método combina la teoría de cantidad de movimiento con el análisis de las fuerzas aerodinámicas que actúan sobre las secciones del álabe, permitiendo determinar su distribución geométrica y estimar las condiciones de operación del rotor. .[1], [6]

Para establecer las condiciones de cálculo se consideró un aerogenerador de eje horizontal de tres palas, con una potencia nominal objetivo de 3 kW. Los parámetros de entrada incluyeron la velocidad del viento, la densidad del aire, el coeficiente de potencia inicial, las eficiencias del sistema y la velocidad de rotación, como se muestra en la Tabla 4.

Tabla 4: Parámetros de entrada para el dimensionamiento BEM

Parámetro	**Valor**
Potencia nominal objetivo	3000 W
Velocidad de referencia del algoritmo	7.5 m/s
Factor de dimensionamiento adoptado	1.4
Velocidad nominal de diseño	10.5 m/s
Coeficiente de potencia inicial	0.43
Eficiencia mecánica	1.00
Eficiencia eléctrica	0.99
Densidad del aire del modelo	1.225 kg/m³
Número de palas	3
Velocidad nominal de rotación	446.7 rpm
Viscosidad cinemática	1.551×10^{-5} m²/s
Elementos radiales	15

Fuente: Elaboración propia con base en los parámetros de entrada y la configuración del algoritmo BEM implementado en MATLAB.

Fuente: Elaboración propia a partir del rotor comercial permanent magnet synchronous generator design utilizada en el proyecto *[22]*

7.3.1 Determinación y justificación de la velocidad de diseño

La caracterización meteorológica del sitio de estudio registró una velocidad media de 2.25 m/s a 10 m de altura. Sin embargo, para el dimensionamiento nominal se utilizó una velocidad de 10.5 m/s, obtenida a partir de una velocidad de referencia de 7.5 m/s y un factor de dimensionamiento de 1.4, establecidos en el algoritmo empleado:

$$Vd = 1.4Vm$$

Donde:

Vd: velocidad nominal de diseño (m/s).

Vm: velocidad de referencia del algoritmo (m/s).

Al sustituir los valores:

$$Vd = 1.4(7.5(^{m}/_{s}))$$

$$Vd = 10.5m/s$$

Donde Vd representa la velocidad nominal de diseño y Vm corresponde a la velocidad de referencia utilizada en el algoritmo BEM, ambas expresadas en metros por segundo (m/s). El factor 1.4 es un parámetro adoptado en la implementación del algoritmo.

Al sustituir la velocidad de referencia de 7.5 m/s, se obtiene una velocidad nominal de diseño de 10.5 m/s, utilizada para el dimensionamiento geométrico del rotor. Este valor no corresponde a la velocidad media registrada en Chicoloapan, sino a una condición nominal establecida para el cálculo. Esta relación corresponde a la configuración particular del programa utilizado y no constituye una expresión general del método BEM.

La selección de esta condición nominal responde al propósito de dimensionar una geometría de referencia para un rotor de 3 kW, diferenciando el punto de diseño de las condiciones promedio del emplazamiento. Desde el punto de vista energético, la potencia disponible en el viento depende del cubo de su velocidad, por lo que dimensionar un rotor para alcanzar 3 kW a una velocidad tan reducida como 2.25 m/s requeriría una superficie de captación considerablemente mayor, bajo supuestos equivalentes de eficiencia y densidad del aire [1], [6].

Por lo tanto, los 10.5 m/s se adoptaron como una condición nominal de cálculo para desarrollar y analizar la geometría propuesta, no como una representación del viento habitual en Chicoloapan. Este criterio permite estudiar el diseño bajo el escenario establecido, aunque no demuestra que dicha velocidad sea la óptima para maximizar la generación energética en el sitio.

7.3.2 Procedimiento de dimensionamiento

Una vez definidas las condiciones nominales, el rotor se dividió en quince elementos radiales. En cada sección se consideraron las propiedades aerodinámicas de los perfiles seleccionados y se calcularon las variables necesarias para establecer la distribución de cuerda y torsión.

Los resultados obtenidos mediante MATLAB sirvieron como base para construir la geometría tridimensional en SolidWorks y desarrollar las evaluaciones posteriores. El procedimiento se fundamentó en los principios del método BEM descritos por Manwell et al. [1] y Hansen [6], considerando también su aplicación al diseño de palas de baja potencia presentada por Vidal Pavón [13].

7.4 Construcción tridimensional de la pala

El modelo tridimensional se desarrolló en SolidWorks utilizando los parámetros geométricos obtenidos mediante BEM. Para ello se consideraron las posiciones radiales, las longitudes de cuerda y los ángulos de torsión definidos para cada sección del álabe.

Primero se establecieron los planos de referencia en las posiciones radiales definidas durante el dimensionamiento. Sobre cada plano se incorporó la sección aerodinámica correspondiente, ajustando su cuerda y orientación conforme a los parámetros del modelo BEM. La Figura 4 muestra la distribución de los planos utilizados durante esta etapa. Sobre estos planos se incorporaron las coordenadas de los perfiles aerodinámicos, ajustando sus dimensiones y orientaciones de acuerdo con los valores del dimensionamiento se observa en la Figura 5.

En la región de raíz se utilizó el perfil NACA 4424, seguido de un perfil intermedio denominado NACAT y del NACA 4421 en el cuerpo y la parte exterior del álabe obsérvese la Figura 6. Para conectar los perfiles de raíz y cuerpo se incorporó una sección intermedia denominada NACAT. Esta permitió establecer la transición geométrica entre NACA 4424 y NACA 4421 durante la construcción de las superficies. La posición de las secciones, sus dimensiones y su orientación se definieron a partir de la distribución radial del diseño.

Posteriormente se desarrolló la superficie tridimensional mediante operaciones de recubrimiento entre las secciones obsérvese la Figura 7.

Durante la preparación del modelo para ANSYS fue necesario realizar aproximadamente quince modificaciones geométricas, principalmente debido a dificultades relacionadas con la continuidad de la geometría y la generación de la malla.

Finalmente, se obtuvo una configuración con la que fue posible continuar el análisis estructural. Los datos definitivos se conservaron en el archivo BEM de Excel posteriormente en el apartado de resultados se mostrarán a más detalle el análisis.

Los fundamentos generales de la distribución radial y la geometría de las palas se encuentran desarrollados por Manwell [1] y Hansen [6].

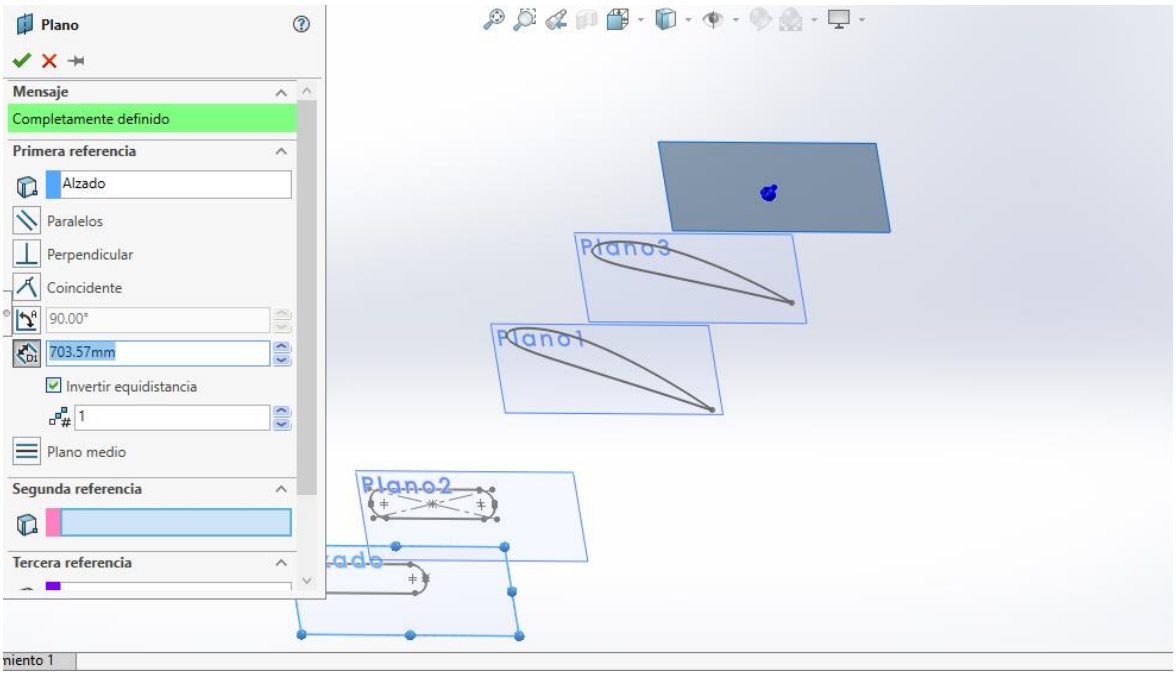


Figura 5: Definición de planos de referencia para las secciones radiales del álabe en SolidWorks

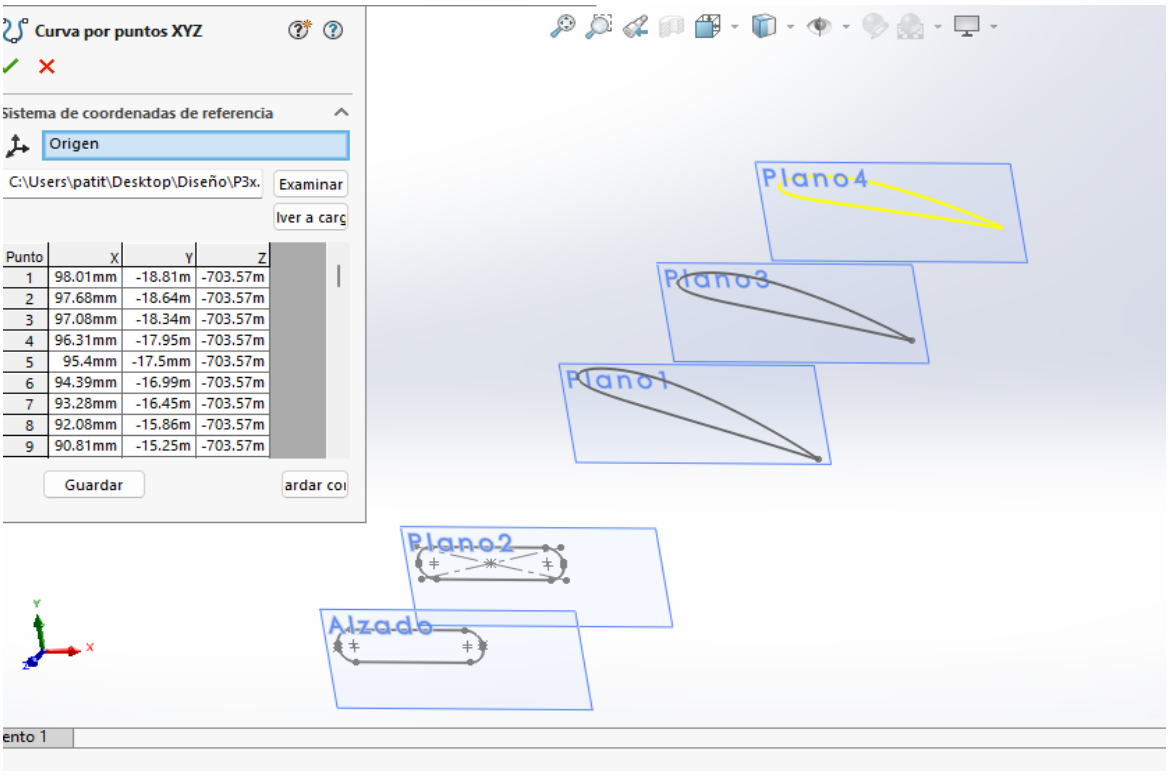


Figura 4 :Construcción de perfiles a partir de coordenadas obtenidas de QBlade. Fuente: elaboración propia mediante SolidWork.

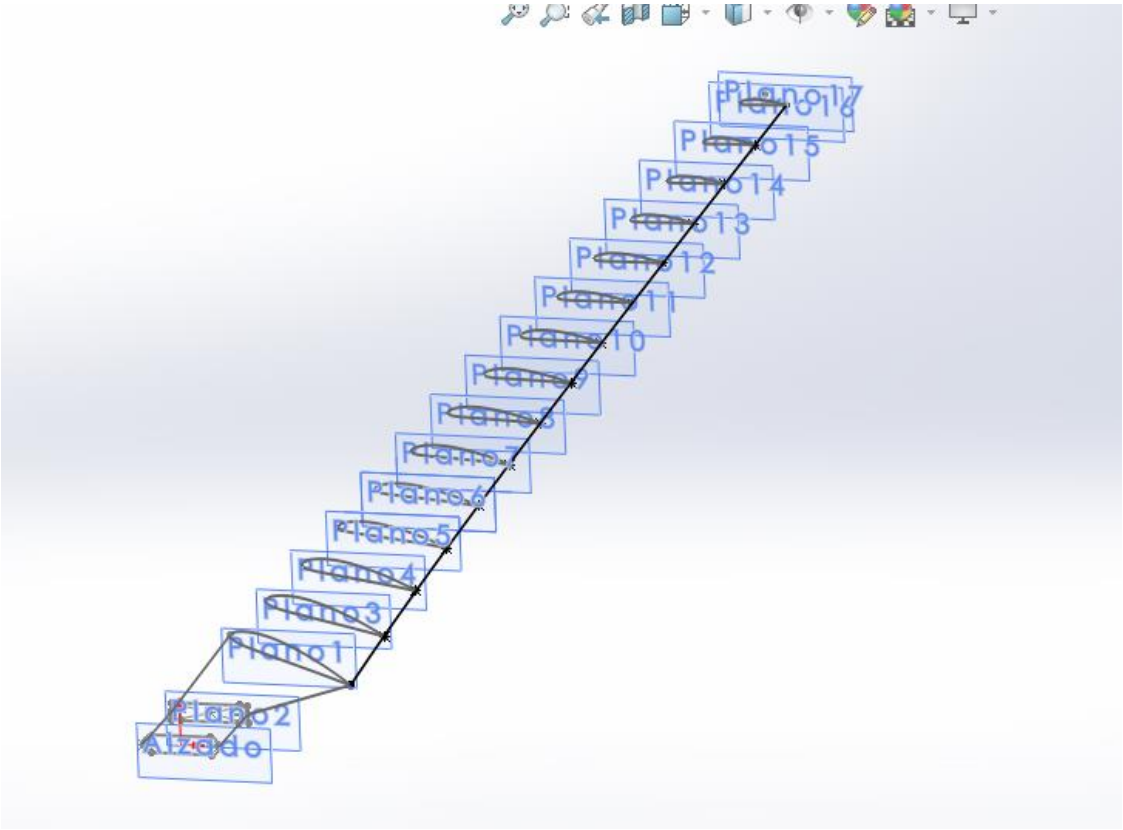


Figura 6: Distribución radial de las secciones utilizadas en el modelado tridimensional. Fuente: elaboración propia mediante SolidWorks

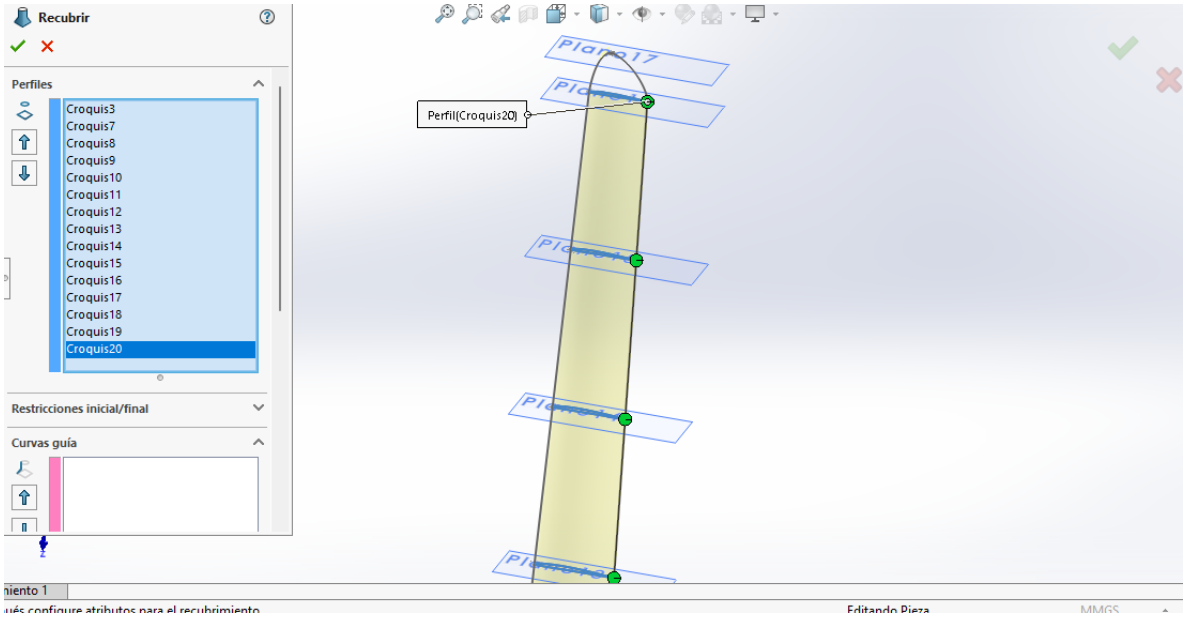


Figura 7: Construcción de la superficie del álabe mediante recubrimiento entre perfiles. Fuente: elaboración propia mediante SolidWorks

7.5 Evaluación estructural mediante elementos finitos

La evaluación estructural se realizó en ANSYS utilizando la geometría tridimensional desarrollada previamente en SolidWorks el modelo incorporado en ANSYS se observa en la Figura 8. Esta etapa tuvo como propósito estudiar la respuesta del álabe ante las condiciones de carga establecidas para el modelo numérico.

Para preparar el análisis se utilizó el entorno ANSYS Composite PrepPost (ACP), con el cual se representó la configuración del material compuesto y la distribución de espesores considerada en el diseño. Se emplearon propiedades de fibra de vidrio seleccionadas de la biblioteca de materiales de ANSYS la distribución del material se observa en la Figura 9.

Posteriormente, se realizó la discretización de la geometría mediante elementos finitos se puede observar en la Figura 10. Durante este proceso se presentaron dificultades relacionadas con el mallado y la preparación del modelo estructural, por lo que fue necesario realizar modificaciones geométricas hasta obtener una configuración con la que pudiera continuar el análisis.

Una vez preparado el modelo se establecieron las condiciones de sujeción y se aplicaron las cargas correspondientes al caso de estudio. El análisis estático permitió obtener la distribución de desplazamientos y esfuerzos, que posteriormente se utilizaron para examinar la respuesta estructural del álabe.

El procedimiento guarda relación con la investigación de Fuster Carrascosa [15], quien evaluó diferentes configuraciones geométricas y materiales para álabes de aerogeneradores de baja potencia mediante elementos finitos. Sin embargo, los resultados de la presente investigación corresponden a las condiciones específicas del modelo desarrollado y no constituyen una validación experimental de una pala fabricada en fibra de vidrio.

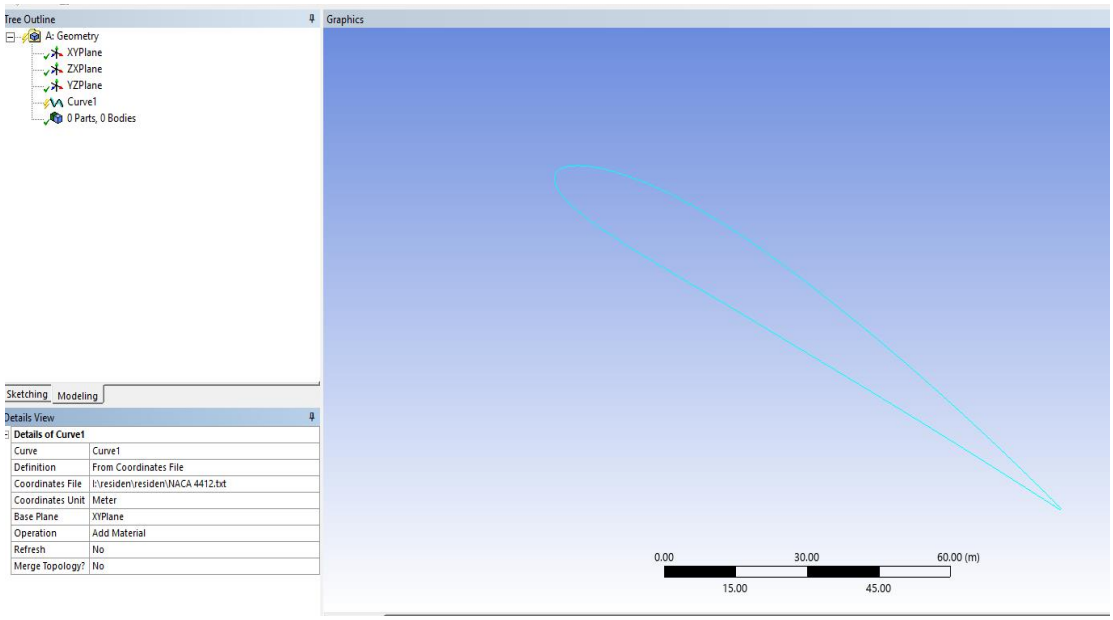


Figura 8 Modelo tridimensional de la pala incorporado al entorno ANSYS. Fuente: elaboración propia mediante ANSYS.

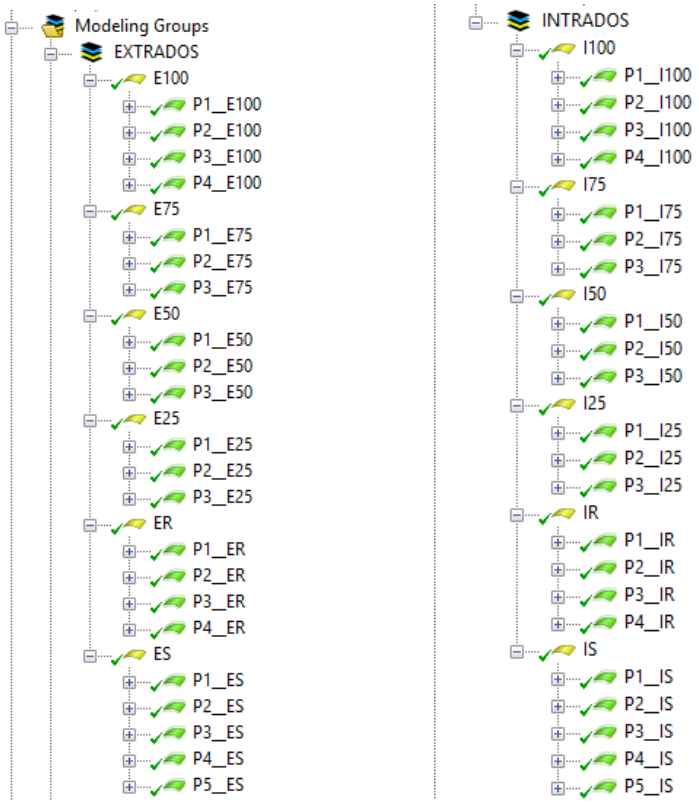


Figura 9: Representación del material compuesto y distribución de espesores en ANSYS ACP. Fuente: elaboración propia mediante ANSYS.

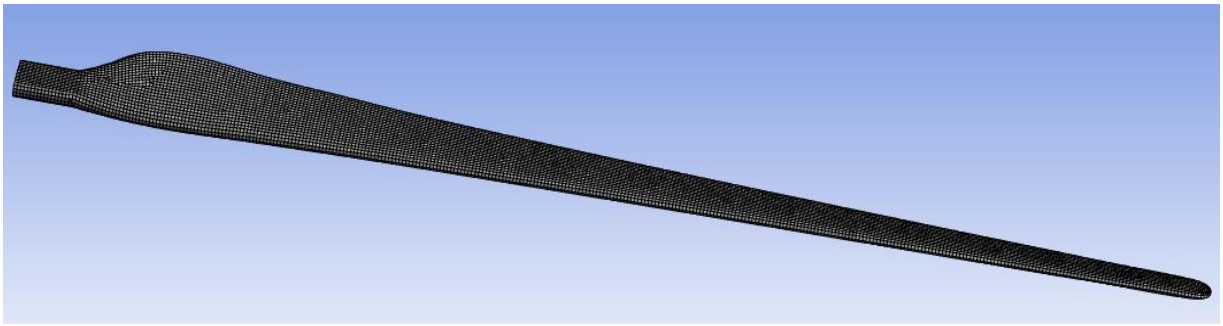


Figura 10: Mallado de la pala para el análisis estructural mediante elementos finitos. Fuente: elaboración propia mediante ANSYS.

7.6 Evaluación del proceso de mecanizado CNC

La etapa de mecanizado se desarrolló a partir de la geometría preparada durante el diseño tridimensional. El modelo se incorporó al entorno de manufactura asistida por computadora para establecer las operaciones necesarias y preparar las trayectorias de la herramienta.

La fabricación se realizó mediante un equipo CNC utilizando madera como material de trabajo. Esta etapa permitió obtener una representación física de la geometría seleccionada y observar las condiciones necesarias para su mecanizado.

La evaluación se limitó al proceso realizado y a la pieza obtenida. Por ello, sus resultados no se consideran una validación experimental del comportamiento aerodinámico ni una demostración de que una pala completa fabricada en fibra de vidrio tendría las mismas características. [16], [17]

La geometría desarrollada en SolidWorks se incorporó al entorno CATIA para preparar las operaciones de manufactura asistida por computadora. En esta etapa se definieron las trayectorias necesarias para el mecanizado de la geometría seleccionada, considerando las características del equipo y del material de trabajo en la Figura 11 y 12 se observa parte de este desarrollo computarizado.

Posteriormente se realizó el mecanizado en madera mediante CNC. La actividad permitió obtener una representación física de la geometría.

La metodología se relaciona con el trabajo de Gómez et al.,[16] que documenta el uso de CAD/CAM y modelos mecanizados durante el desarrollo de palas eólicas. Los criterios generales de selección de materiales y procedimientos de fabricación pueden complementarse con Quesada-Bedoya et al. [17]

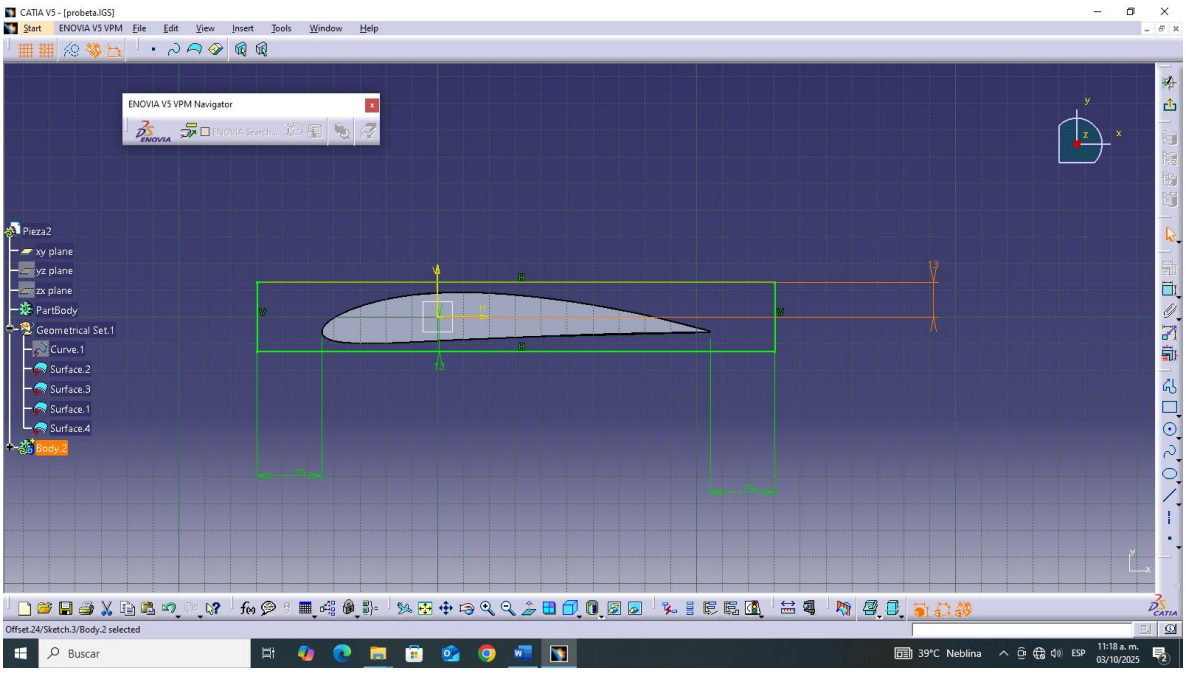


Figura 11: Transferencia de la geometría del álabe desde SolidWorks al entorno CATIA. Fuente: elaboración propia mediante CATIA.

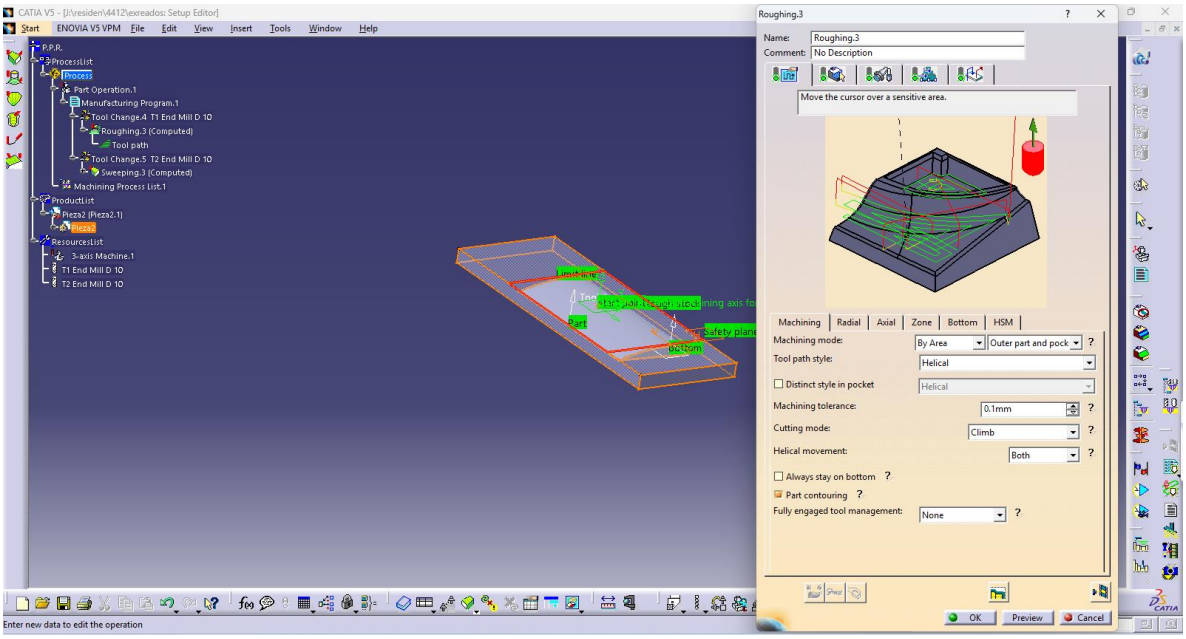


Figura 12: Preparación de las operaciones y trayectorias de mecanizado en CATIA. Fuente: elaboración propia mediante CATIA.

8 Resultados y discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo de la investigación, siguiendo la secuencia establecida en la metodología. Primero se analiza el recurso eólico del sitio de estudio y posteriormente se presentan los resultados de la evaluación de perfiles aerodinámicos y el dimensionamiento de la pala mediante el método BEM.

Después se muestran la geometría tridimensional desarrollada en SolidWorks, la respuesta estructural obtenida mediante ANSYS y los resultados del mecanizado CNC. Cada etapa se analiza considerando las condiciones utilizadas y las limitaciones de los procedimientos realizados.

Finalmente, se relacionan los resultados con los objetivos de la investigación para evaluar el alcance del diseño propuesto y contrastar la hipótesis planteada.

8.1Caracterización del recurso eólico.

8.1.1Estadísticos descriptivos del viento

La caracterización meteorológica mostró una velocidad media de 2.25 m/s a 10 m y de 3.19 m/s a 50 m de altura. Estos valores son considerablemente inferiores a los 10.5 m/s utilizados como condición nominal en el dimensionamiento BEM.

La diferencia responde a que ambos valores cumplen funciones distintas: la velocidad media describe el comportamiento general del recurso eólico, mientras que la velocidad de diseño corresponde al escenario adoptado para calcular la geometría del rotor. En este caso, dicho escenario se estableció mediante los parámetros de referencia del algoritmo y no a partir del promedio meteorológico del emplazamiento.

Aunque la serie analizada registró velocidades superiores a 10.5 m/s, su ocurrencia no puede considerarse habitual sin examinar su frecuencia. En consecuencia, los resultados nominales del rotor no representan directamente su generación energética en Chicoloapan.

Esta diferencia constituye una limitación relevante del diseño y señala la necesidad de evaluar una curva de potencia para distintas velocidades, considerando también las condiciones atmosféricas del sitio.[1], [14], [21]

Los resultados se presentan en la Tabla 5. La diferencia entre ambas alturas muestra que las condiciones del viento cambian con la elevación, mientras que la dispersión de los registros indica que la velocidad no permanece constante a lo largo del periodo estudiado.

Estos valores describen el comportamiento regional representado por el conjunto de datos meteorológicos utilizado y no corresponden a mediciones realizadas directamente dentro del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan.

Tabla 5: Estadísticos descriptivos de la velocidad del viento en el área de estudio durante 2016–2025.

Indicador	**Resultado**
Periodo	02/01/2016–31/12/2025
Registros horarios válidos.	87 648
Velocidad media a 10 m	2.25 m/s
Desviación estándar a 10 m	1.29 m/s
Mediana a 10 m	2.02 m/s
Velocidad máxima horaria a 10 m	14.02 m/s
Velocidad media a 50 m	3.19 m/s
Velocidad de referencia BEM	7.5 m/s
Velocidad nominal de diseño	10.5 m/s

Fuente: elaboración propia a partir de la serie horaria NASA POWER/MERRA-2 utilizada en el proyecto.

8.1.2 Variación interanual de la velocidad del viento

Para identificar los cambios de velocidad entre los años estudiados se compararon los promedios anuales obtenidos de la serie meteorológica. Como se muestra en la Figura 13, la velocidad media presentó variaciones durante el periodo 2016–2025.[21]

Estas diferencias muestran que las condiciones del viento no fueron iguales en todos los años. Por ello, el análisis de una serie histórica permite disponer de una referencia más amplia que la obtenida mediante registros de un solo año.[1]

Los promedios anuales se consideraron como parte de la caracterización del recurso, sin asumir que las variaciones observadas representan necesariamente una tendencia de aumento o disminución a largo plazo.

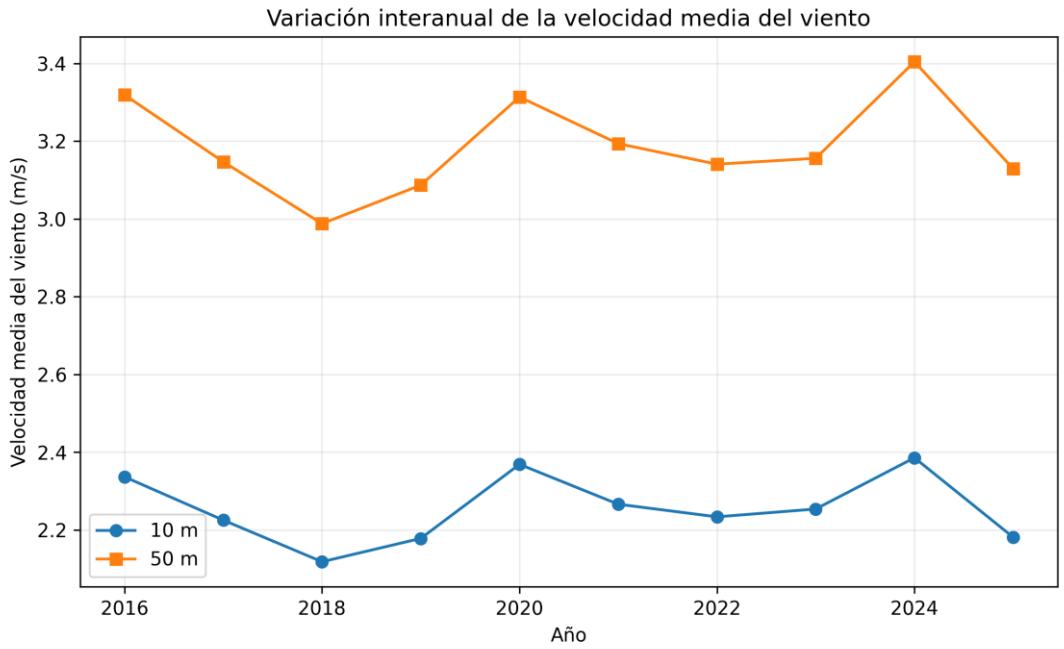


Figura 13: Variación interanual de la velocidad media del viento a 10 m. Fuente: elaboración propia con datos NASA POWER/MERRA-2.

8.1.3 Comportamiento mensual de la velocidad del viento

La variación mensual se examinó mediante el cálculo de la velocidad media correspondiente a cada mes del año, considerando los registros disponibles durante el periodo de estudio.

Como se observa en la Figura 14, la velocidad del viento presenta diferencias entre los meses analizados. En abril se obtuvo una velocidad media aproximada de 2.46 m/s, mientras que los demás meses presentaron los valores correspondientes a su comportamiento estacional.[1], [21]

Estos resultados permiten identificar los periodos del año con diferentes condiciones de viento. Sin embargo, la variación mensual debe interpretarse junto con la distribución de frecuencias, ya que el promedio por sí solo no describe todas las velocidades que se presentan durante cada periodo.

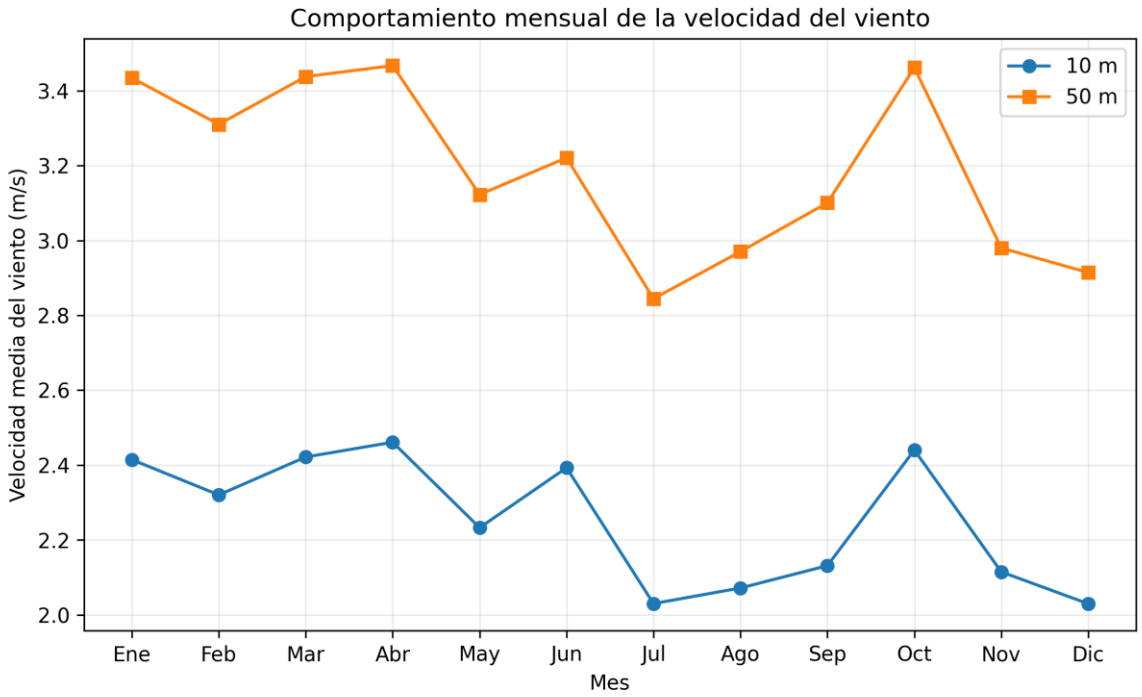


Figura 14: Comportamiento mensual de la velocidad del viento a 10 m. Fuente: elaboración propia con datos NASA POWER/MERRA-2.

8.1.4 Variación horaria de la velocidad del viento

El análisis horario permitió identificar los cambios de velocidad que se presentan a lo largo del día. Los promedios obtenidos muestran una velocidad mínima aproximada de 1.65 m/s a las 04:00 horas y una máxima de 2.90 m/s a las 14:00 horas.

Como se observa en la Figura 15, la velocidad media tiende a presentar valores diferentes entre las primeras horas del día y el periodo de la tarde. Esta variación es

relevante porque las condiciones de operación de un aerogenerador no dependen únicamente de la velocidad media general, sino también de la distribución temporal del recurso.

Los horarios corresponden a la referencia temporal de la base meteorológica utilizada, por lo que no deben interpretarse automáticamente como horas civiles locales.

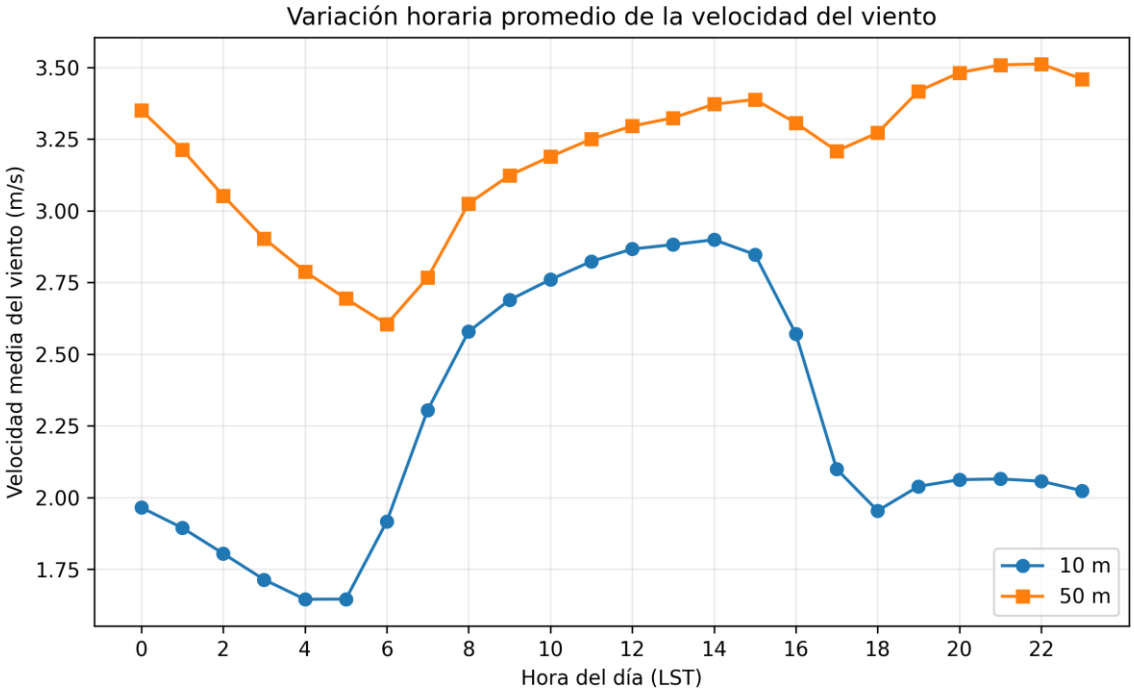


Figura 15: Variación horaria promedio de la velocidad del viento a 10 m. Fuente: elaboración propia con datos NASA POWER/MERRA-2. Horarios expresados en tiempo solar local (LST).

8.1.5 Distribución de Weibull

La distribución de velocidades se analizó mediante un modelo Weibull de dos parámetros. En el procesamiento realizado se obtuvieron un parámetro de forma (k=1.85) y un parámetro de escala (c=2.54) m/s.

Como se presenta en la Figura 16, la curva de Weibull permite representar la distribución de velocidades y compararla con las frecuencias obtenidas a partir de los registros horarios.

Estos resultados complementan la información de la velocidad media, debido a que muestran cómo se distribuye el recurso eólico entre diferentes intervalos de velocidad.

Esta información es necesaria para relacionar las condiciones del sitio con el comportamiento esperado de un aerogenerador.[2]

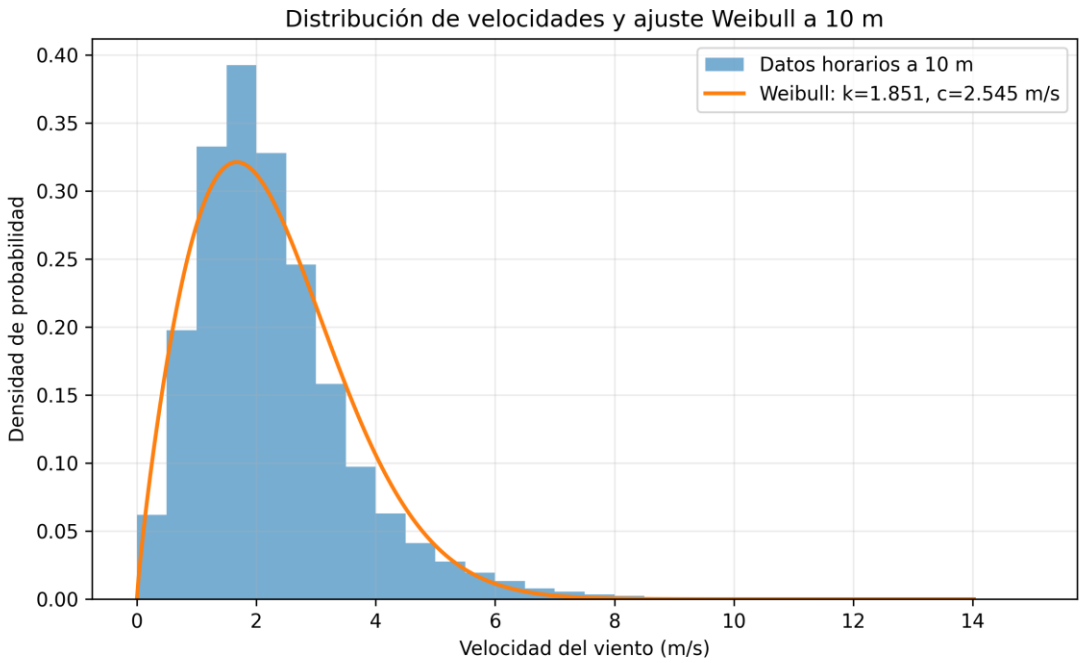


Figura 16: Histograma de velocidades y ajuste Weibull a 10 m. Fuente: elaboración propia con datos NASA POWER/MERRA-2.

8.1.6 Dirección predominante del viento

La distribución direccional permitió identificar los sectores desde los que se presentó el viento con mayor frecuencia durante el periodo de estudio.

Como se observa en la Figura 17, el sector noreste registró una frecuencia aproximada del 20.45 %, lo que lo ubica como una de las direcciones predominantes de la serie analizada.

La información obtenida describe el comportamiento direccional del recurso regional. Su interpretación debe considerar que las condiciones del viento en un emplazamiento específico también pueden verse modificadas por edificaciones, obstáculos y características del terreno.[1], [4]

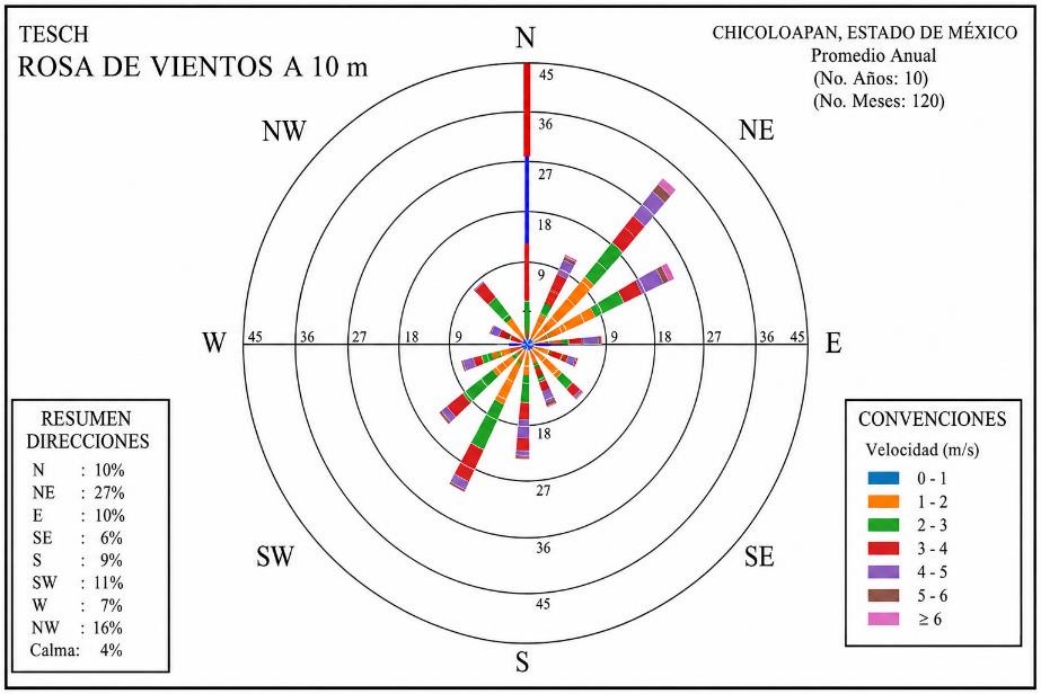


Figura 17: Rosa de los vientos del área de estudio durante el periodo 2016–2025. Fuente: elaboración propia con datos NASA POWER/MERRA-2.

8.1.7 Variación de la velocidad del viento con la altura

La comparación de los registros a 10 y 50 m permitió identificar una diferencia en la velocidad media del viento. A 10 m se obtuvo un promedio de 2.25 m/s, mientras que a 50 m el valor aumentó a 3.19 m/s.

Como se observa en la Figura 18, la velocidad representada por el producto meteorológico fue mayor a la altura de 50 m. Esta diferencia debe considerarse al interpretar las condiciones de operación de un aerogenerador, debido a que la altura de instalación influye en la velocidad del viento disponible.

No obstante, los valores corresponden a las alturas representadas por la fuente meteorológica y no sustituyen una caracterización local a la altura exacta del buje. [1]

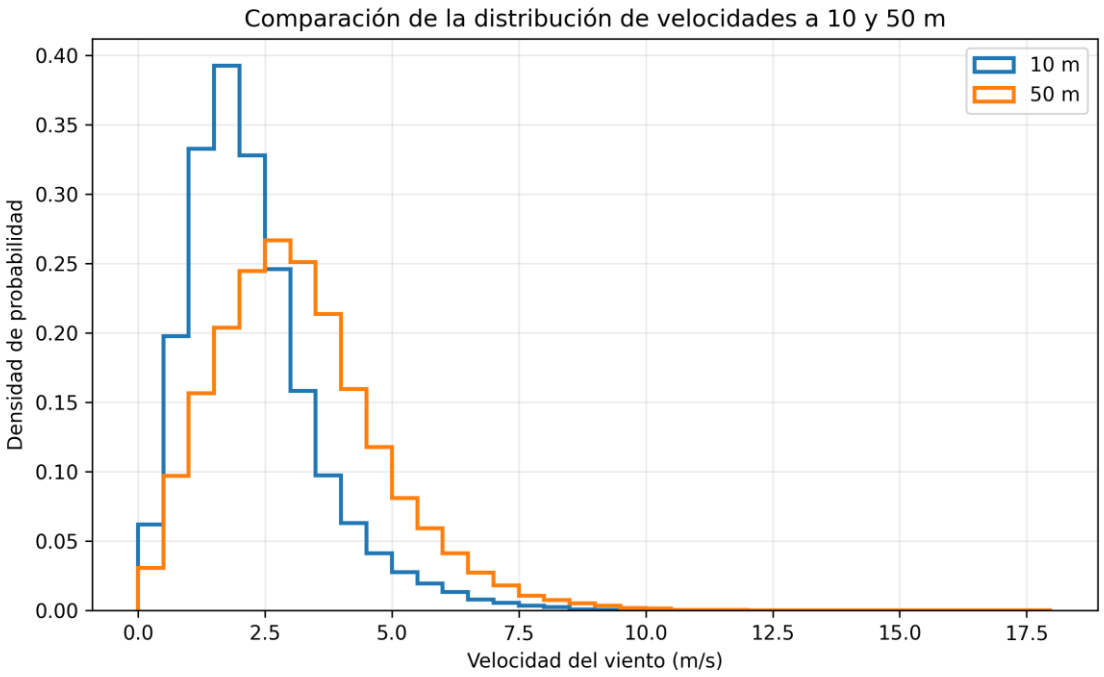


Figura 18: *Comparación de las velocidades del viento a 10 y 50 m. Fuente: elaboración propia con datos NASA POWER/MERRA-2.*

8.1.8 Relación entre el recurso eólico y las condiciones nominales de diseño

La caracterización del recurso eólico mostró una velocidad media aproximada de 2.25 m/s a una altura de 10 m. En cambio, para el dimensionamiento del rotor mediante BEM se utilizó una velocidad nominal de diseño de 10.5 m/s.

Esta diferencia indica que el punto nominal considerado durante el diseño no representa la velocidad media del emplazamiento. Por lo tanto, los resultados obtenidos para esa condición deben interpretarse como estimaciones del comportamiento del rotor a la velocidad establecida y no como la potencia que produciría normalmente durante su operación en Chicoloapan.

La evaluación de la generación energética del aerogenerador requeriría relacionar su comportamiento a diferentes velocidades con la frecuencia de ocurrencia del viento. Por ello, los resultados meteorológicos se utilizaron como referencia para discutir las condiciones del diseño y sus limitaciones, sin asumir que la potencia nominal objetivo de 3 kW se alcanza de manera habitual en el sitio.

8.2 Evaluación aerodinámica de los perfiles

8.2.1 Comparación de los perfiles candidatos

La evaluación aerodinámica se realizó considerando los cinco perfiles seleccionados como candidatos durante la metodología: NACA 0012, NACA 3412, NACA 23012, NACA 4421 y NACA 4424.

Los resultados se organizaron a partir de los coeficientes de sustentación y arrastre y su relación, utilizando las polares obtenidas para las condiciones de Reynolds evaluadas. La Tabla 6 presenta los indicadores utilizados para comparar el comportamiento de los perfiles.

Esta comparación permite identificar diferencias aerodinámicas bajo las condiciones del análisis. Sin embargo, los valores máximos de sustentación y de la relación sustentación-arrastre no necesariamente ocurren al mismo ángulo de ataque, por lo que deben interpretarse como indicadores independientes.[6], [10], [11]

Tabla 6: Indicadores aerodinámicos de los perfiles NACA candidatos obtenidos mediante XFoil/QBlade.

PERFIL	NACA 0012	α	NACA 3412	α	NACA 23012	α	NACA 4421	α	NACA 4424	α
CL/CD MAX	56.75651	6	91.77022	6	68.28281	10	75.5948	7	66.7602	7
CL MAX	1.14232	13	1.41908	16	1.44540	14	1.55666	16	1.54160	17
CD MAX	0.21726	18	0.17741	20	0.15101	20	0.10298	20	0.09537	20
CL/CD MIN	-55.04898	-5	-16.25626	-5	-24.74278	-5	-5.7553	-5	-5.3426	-5
CL MIN	-0.62018	-5	-0.20950	-5	-0.45072	-5	-0.0756	-5	-0.0740	-5
CD MIN	0.00732	0	0.00752	0	0.00775	-1	0.01164	1	0.01291	0

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos de XFoil/QBlade.

8.2.2 Influencia del número de Reynolds en los perfiles seleccionados

La comparación de las polares aerodinámicas permitió observar cambios en la relación sustentación-arrastre conforme aumentó el número de Reynolds.

Como se muestra en la Figura 19, el perfil NACA 4421 presentó valores máximos de (CL/CD) superiores a los registrados para NACA 4424 en las cinco condiciones evaluadas. A Reynolds de 200 000 se obtuvieron valores aproximados de 58.33 y 55.72, respectivamente, mientras que a Reynolds de 600 000 aumentaron a 88.24 y 74.71 como se muestra en la Tabla 7.

Los resultados muestran que el desempeño relativo de ambos perfiles cambia con las condiciones del flujo y que el NACA 4421 alcanzó una mayor relación máxima sustentación-arrastre dentro del intervalo considerado. No obstante, la selección definitiva también tuvo en cuenta las características geométricas de cada región de la pala. [6], [10]

Tabla 7:: indicadores aerodinámicos de los perfiles NACA

Reynolds	**NACA 4421: CL/CD máx.**	**NACA 4424: CL/CD máx.**
200 000	58.33	55.72
300 000	70.34	64.60
400 000	77.47	68.16
500 000	83.60	71.65
600 000	88.24	74.71

Fuente: Elaboración propia a partir de las polares de QBlade/XFoil

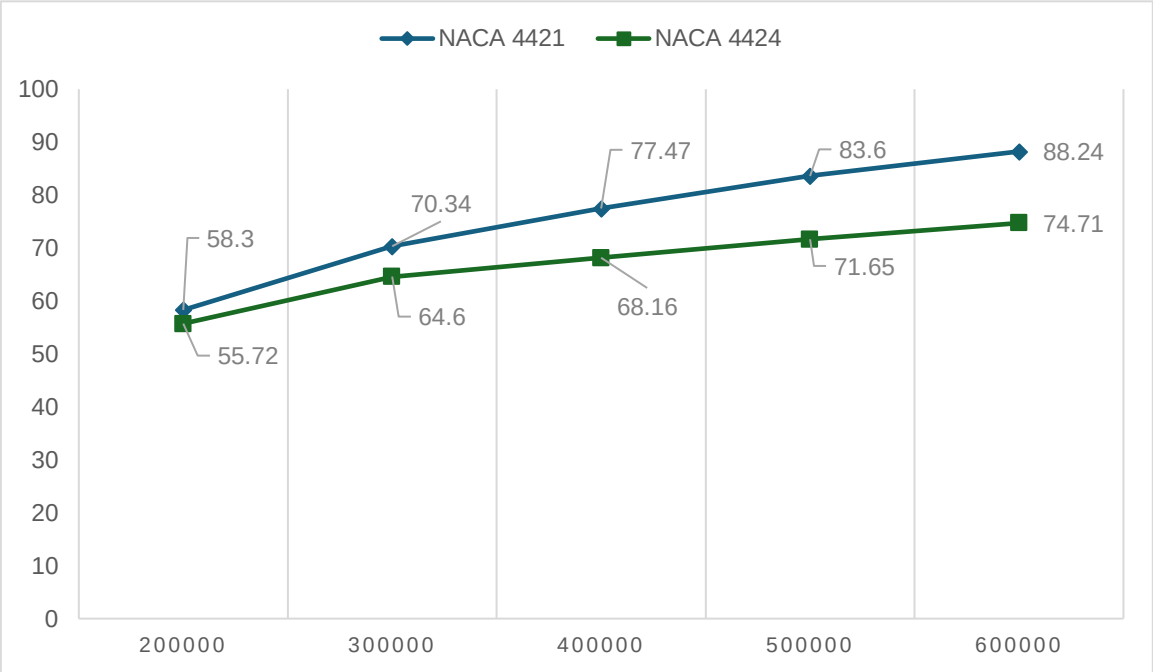


Figura 19: Variación de la relación máxima sustentación-arrastre de NACA 4421 y NACA 4424 con el número de Reynolds. Fuente de la figura: elaboración propia a partir de las polares de QBlade/XFoil.

8.2.3 Evaluación multicriterio de los perfiles

La comparación de los perfiles se desarrolló mediante los criterios establecidos en la metodología, considerando la relación sustentación-arrastre, el coeficiente máximo de sustentación, el espesor relativo y la facilidad de mecanizado.

Los resultados aerodinámicos se normalizaron mediante una escala continua de 1 a 5, utilizando los promedios de los valores máximos obtenidos para los cinco números de Reynolds evaluados. La Tabla 8 presenta las calificaciones calculadas para los criterios aerodinámicos.

El perfil NACA 3412 obtuvo la mayor calificación en la relación sustentación-arrastre, mientras que NACA 4421 presentó el mayor promedio del coeficiente máximo de sustentación. Estas diferencias muestran que los perfiles no mantienen la misma posición cuando se evalúan indicadores distintos.

La selección definitiva también debe considerar la función de cada sección dentro del álabe, especialmente el espesor requerido en la raíz y las condiciones geométricas necesarias para desarrollar la transición y construir la pala.

Tabla 8: Resultados de la evaluación multicriterio de los cinco perfiles aerodinámicos

Perfil	CL/CD 40 %	Cl máx. 25 %	Espesor 25 %	Manuf. 10 %	P/5
NACA 0012	0.2474	0.1834	0.1250	0.1000	3.28
NACA 3412	0.4000	0.2279	0.1250	0.1000	4.26
NACA 23012	0.2976	0.2321	0.1250	0.1000	3.77
NACA 4421	0.3295	0.2500	0.2188	0.0800	4.39
NACA 4424	0.2910	0.2476	0.2500	0.1000	4.44

Fuente de la figura: elaboración propia a partir de las polares de QBlade/XFoil.

Para obtener la ponderación se utiliza la siguiente formula:

$$S_{ij} = 1 + 4\left(\frac{x_{ij} - x_{i,\min}}{x_{i,\max} - x_{i,\min}}\right)$$

S_{ij} Calificación normalizada del perfil j para el criterio i, entre 1 y 5.

x_{ij} Valor aerodinámico obtenido por el perfil j en el criterio i.

$x_{i,min}$ Valor mínimo del criterio i entre los cinco perfiles comparados.

$x_{i,max}$ Valor máximo del criterio i entre los cinco perfiles comparados.

i Criterio evaluado, por ejemplo, CL/CD o Cl. máx.

j Perfil aerodinámico evaluado, por ejemplo, NACA 4421.

1 Calificación mínima de la escala.

4 Amplitud de la escala, calculada como 5-1

8.2.4 Configuración de perfiles seleccionada

La configuración final de la pala se estableció mediante la combinación de los perfiles NACA 4424 y NACA 4421, incorporando una sección intermedia denominada NACAT.

El NACA 4424 se utilizó en la región de raíz, considerando su mayor espesor relativo. Por otra parte, el NACA 4421 se empleó en el cuerpo y la zona exterior del álabe, donde los resultados aerodinámicos registrados permitieron considerar su aplicación.

Entre ambas geometrías se incorporó un perfil de transición para conectar las secciones durante la construcción tridimensional. La Figura 21 muestra las diferencias geométricas entre los tres perfiles que conformaron el diseño definitivo.

Esta combinación se utilizó como base para la distribución radial de la pala y su modelado posterior mediante SolidWorks.

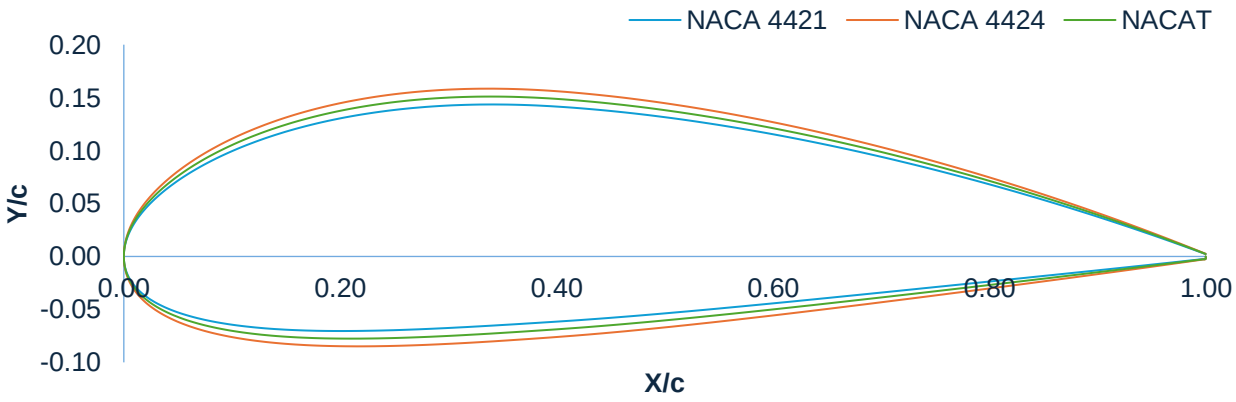


Figura 19: Geometrías de los perfiles NACA 4424, NACAT y NACA 4421 incorporados al diseño definitivo.

8.3 Resultados del dimensionamiento aerodinámico mediante BEM

8.3.1 Características generales de la geometría

El dimensionamiento desarrollado en MATLAB permitió obtener los parámetros geométricos correspondientes a la configuración final del rotor. El cálculo se realizó para un aerogenerador de tres palas, con una potencia nominal objetivo de 3 kW y una velocidad de diseño de 10.5 m/s.

La información definitiva se organizó en el archivo BEM utilizado para el proyecto. En la hoja de dimensionamiento se registró una posición radial exterior de aproximadamente 1.714 m, correspondiente a la geometría utilizada como referencia para el modelado.

La Tabla 9 presenta las características generales de esta configuración. Los valores se interpretan como resultados del dimensionamiento geométrico.

Tabla 9.: Parámetros geométricos de la configuración final obtenida mediante BEM.

Parámetro	**Valor**
Potencia nominal objetivo	3 kW
Número de palas	3
Velocidad nominal utilizada	10.5 m/s
Posición radial exterior registrada	1.71448 m
Diámetro correspondiente a esa posición	3.42896 m
Número de estaciones	15

Fuente: Elaboración propia datos obtenidos de BEM a través de Matlab

8.3.2 Distribución radial de cuerda y torsión

Los resultados del dimensionamiento muestran una disminución progresiva de la longitud de cuerda hacia la región exterior de la pala. En la primera estación aerodinámica, ubicada aproximadamente a 0.231 m del eje, se registró una cuerda linealizada cercana a 0.122 m, mientras que, en la última estación, situada a 1.689 m, el valor disminuyó a aproximadamente 0.045 m.

Como se presenta en la Tabla 10 y la Figura 22, esta distribución permitió establecer las dimensiones de las secciones utilizadas posteriormente en el modelo tridimensional. Por otra parte, los ángulos calculados mediante BEM presentan variaciones a lo largo del radio, como se muestra en la Figura 23. Estos valores se emplearon como referencia para definir la orientación de los perfiles, tomando en cuenta las condiciones aerodinámicas previstas para cada estación.

Tabla 10: Dimensiones y orientación de las secciones utilizadas en la construcción geométrica del álabe.

	r(mm)	cL(mm)	Beta	EM	PEM	Perfiles
	0.00	73				Rectangular
	84.47	73				
1	231.23	122	25.2	29	36.28	4424
2	335.39	116	18.3	28	34.66	
3	439.55	111	13.8	25	32.80	PT22.50
4	543.71	105	9.9	22	31.40	4421
5	647.87	100	7.7	12	29.77	
6	752.03	94	6.0	11	28.14	
7	856.19	89	4.7	11	26.51	
8	960.35	83	3.7	10	24.88	
9	1064.52	78	2.9	9	23.25	
10	1168.68	73	2.2	9	21.62	
11	1272.84	67	1.6	8	19.99	
12	1377.00	62	1.1	7	18.36	
13	1481.16	56	0.7	7	16.73	
14	1585.32	51	0.3	6	15.10	
15	1689.48	45	0.0	5	13.47	
P	1714.48	3	0.0	0	0.89	

Fuente: Elaboración propia datos obtenidos de BEM a través de Matlab

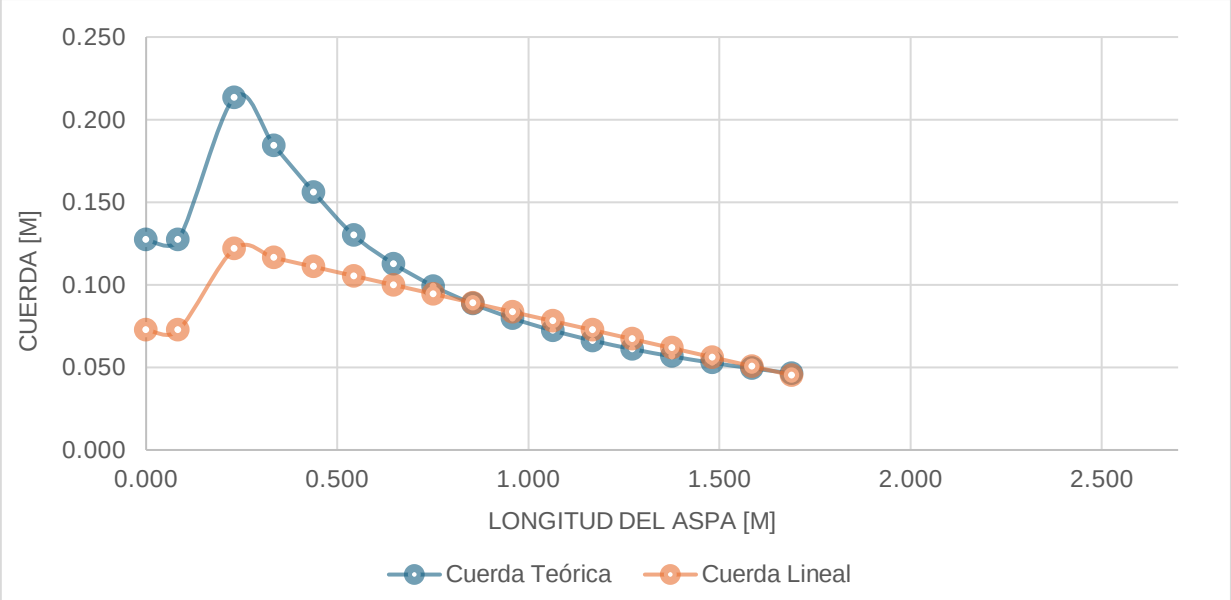


Figura 20: Distribución radial de cuerda obtenida mediante BEM y ajustada para el modelado tridimensional.

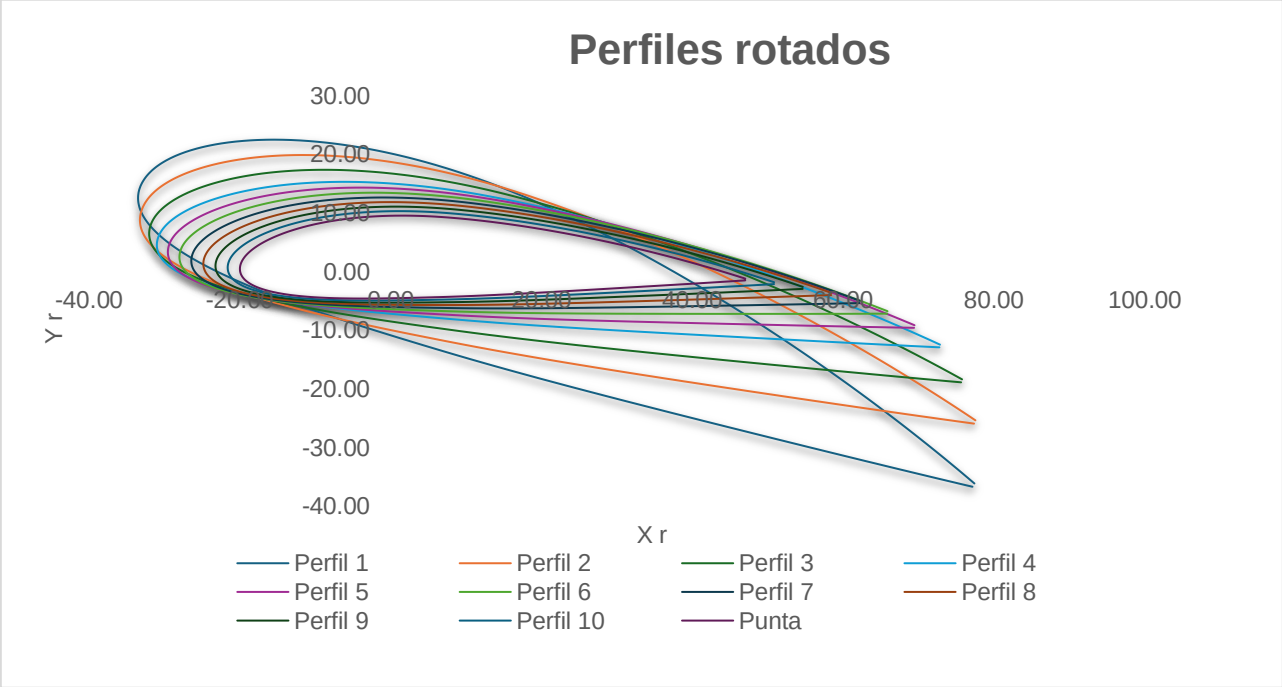


Figura 21: Variación radial de los ángulos geométricos utilizados para definir la orientación de las secciones.

8.3.3 Resultados de empuje, torque y potencia

La hoja de operación BEM permitió obtener los valores correspondientes a las fuerzas y momentos calculados para las distintas estaciones radiales de la pala.

En los resultados globales se registró un empuje total de 542.27 N y una potencia calculada de 3746.76 W, con un coeficiente de potencia aproximado de 0.523. Los datos se presentan en la Tabla 11, mientras que la Figura 24 permite observar la distribución radial del empuje.

Tabla 11: Resultados globales registrados en el análisis de operación mediante BEM.

Indicador	**Valor registrado**
Empuje total	542.27 N
Empuje por álabe	180.76 N
Momento identificado como Torque Axial (Flap)	80.10 N·m
Potencia calculada	3746.76 W
Coeficiente de potencia	0.52283

Fuente: Elaboración propia datos obtenidos de BEM a través de Matlab

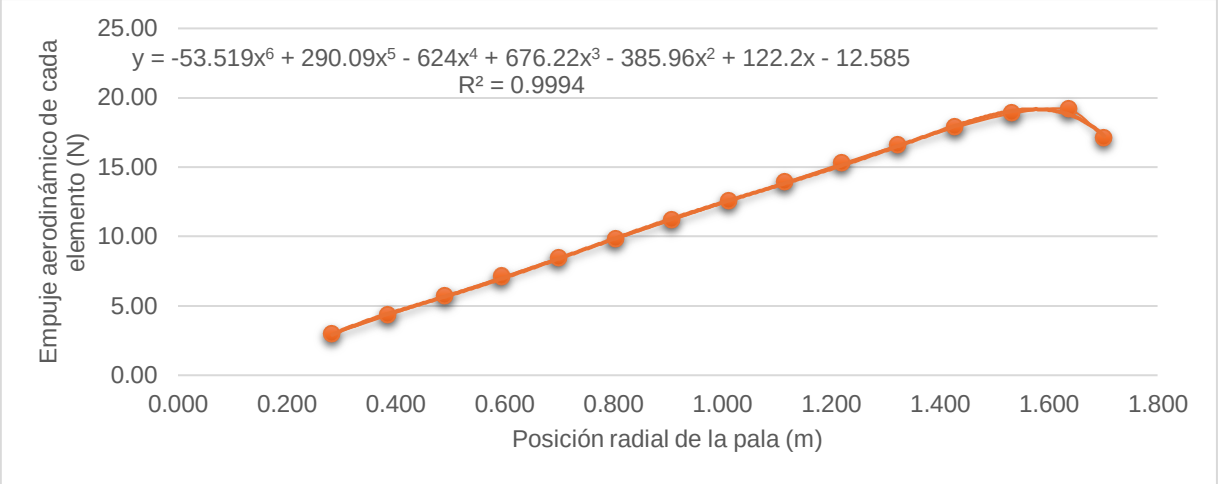


Figura 22: Distribución de las contribuciones elementales al empuje axial del rotor, calculadas mediante BEM.

8.4 Geometría tridimensional definitiva

Con los parámetros obtenidos mediante BEM se desarrolló la geometría tridimensional del álabe en SolidWorks. El modelo incorporó el perfil NACA 4424 en la raíz, NACAT como sección de transición y NACA 4421 en el cuerpo y la región exterior.

Como se observa en la Figura 25, las secciones se integraron para construir una geometría continua a lo largo de la pala. El modelo final se obtuvo después de realizar aproximadamente quince modificaciones durante el desarrollo y la preparación del análisis estructural.

Los ajustes estuvieron relacionados principalmente con la construcción geométrica y las dificultades encontradas durante el mallado en ANSYS. La configuración definitiva fue la que permitió continuar el análisis mediante elementos finitos.

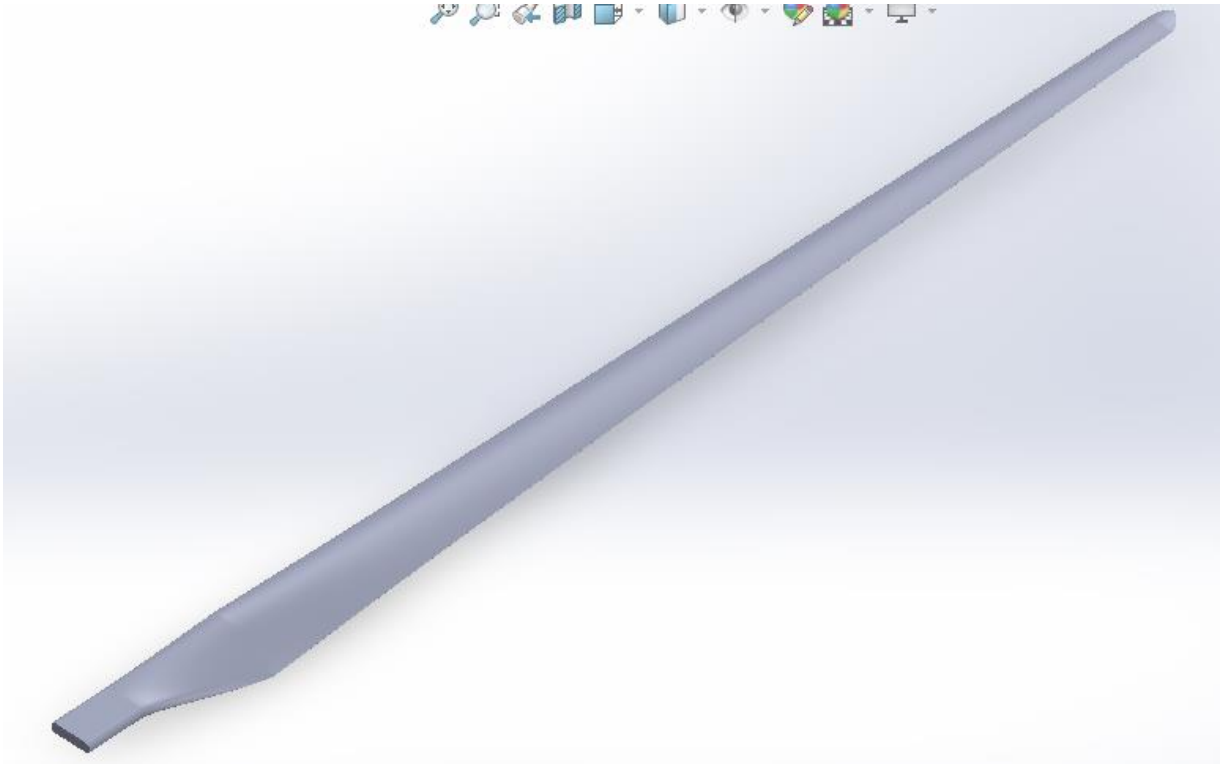


Figura 23: Geometría tridimensional definitiva del álabe con transición entre los perfiles NACA 4424 y NACA 4421, desarrollada en SolidWorks.

8.5 Resultados del análisis estructural.

Una vez obtenida la geometría tridimensional definitiva de la pala, se realizó el análisis estructural mediante ANSYS para estudiar su comportamiento bajo las condiciones de carga establecidas. Esta evaluación permitió identificar la distribución de deformaciones y esfuerzos en el modelo, considerando la configuración geométrica, las propiedades del material compuesto y las condiciones de sujeción utilizadas durante la simulación.

Los resultados obtenidos corresponden al modelo desarrollado mediante elementos finitos y se presentan de manera general en la Tabla 12. Se incluyen los valores máximos de deformación total y esfuerzo principal, así como algunas características del mallado y la distribución de espesores utilizados en el análisis.

Posteriormente, se examinan por separado la deformación y el esfuerzo principal máximo, con el propósito de identificar las regiones de mayor respuesta estructural y analizar los resultados dentro de las condiciones consideradas.

Tabla 12: Características del modelo de elementos finitos y resultados estructurales registrados mediante ANSYS.

Variable	**Valor**
Deformación total máxima	104.27 mm
Esfuerzo principal máximo mostrado	24.569 MPa
Espesor mínimo representado en ACP	3.96 mm
Espesor máximo representado en ACP	21.78 mm
Elementos de malla indicados	12 787

Fuente: Elaboración propia datos obtenidos de ANSYS

8.5.1 Distribución de deformaciones

El análisis estructural permitió obtener la distribución de desplazamientos del álabe bajo las condiciones de carga establecidas. Como se muestra en la Figura 26, la deformación total aumentó hacia la región exterior de la pala y alcanzó un valor máximo de 104.27 mm.

Este resultado corresponde a la respuesta del modelo numérico, considerando la geometría, las restricciones y las propiedades del material utilizadas en ANSYS. Para determinar si la deformación es admisible debe compararse con los criterios funcionales y estructurales definidos para el diseño.

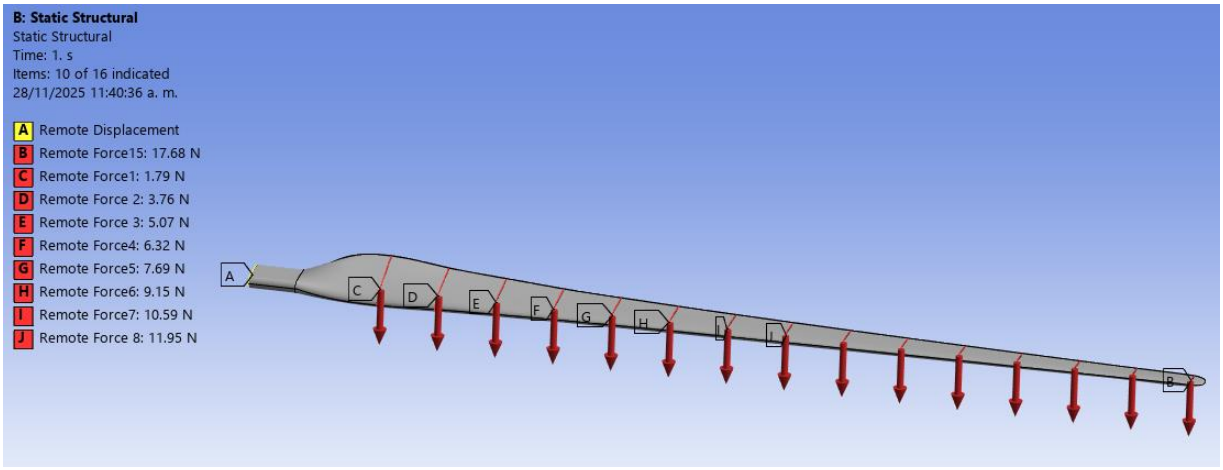


Figura 24: Distribución de deformación total del álabe bajo las cargas aplicadas en ANSYS. Fuente: Elaboración propia datos obtenidos de ANSYS

8.5.2 Distribución de esfuerzos principales

El análisis estructural también permitió conocer la distribución del esfuerzo principal máximo. En la condición simulada se registró un valor de 24.569 MPa.

Como se observa en la Figura 27, la distribución de esfuerzos no es uniforme a lo largo de la pala, presentándose regiones de mayor concentración según las condiciones de carga y sujeción.

El resultado debe interpretarse considerando la configuración del material compuesto definida en ANSYS. Por esta razón, no se considera suficiente para demostrar por sí solo el cumplimiento de los criterios de resistencia de una pala fabricada en fibra de vidrio.

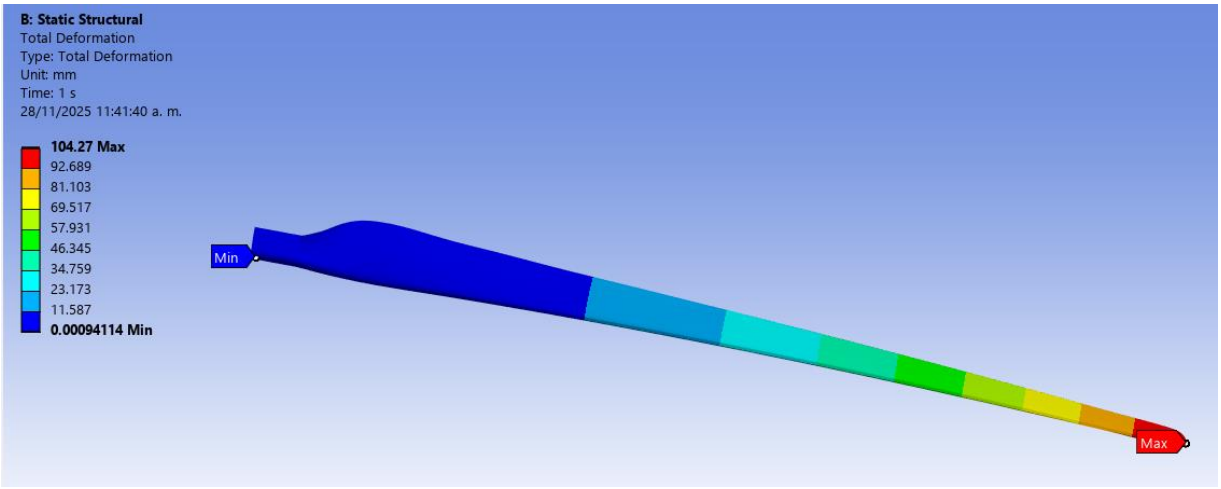


Figura 25: Identifica que el resultado corresponde a Maximum Principal Stress, con la referencia de capa y superficie indicada por ANSYS cuando sea pertinente. No lo cambies por esfuerzo equivalente de von Mises.

8.6 Resultados del proceso de mecanizado CNC

La etapa de manufactura permitió evaluar la reproducción física de una geometría aerodinámica mediante un proceso de mecanizado por control numérico computarizado. Para ello, se utilizaron las herramientas de manufactura asistida por computadora disponibles en CATIA, donde se prepararon las operaciones y trayectorias necesarias para trabajar el material seleccionado.

A partir de esta preparación se obtuvo una pieza mecanizada en madera, utilizada como evidencia física del procedimiento realizado. Los resultados de esta etapa se presentan mediante la visualización de las operaciones programadas y el producto obtenido, con el propósito de relacionar el modelo digital con el proceso de fabricación.

Los programas de control numérico utilizados durante esta etapa se incorporan en el Anexo G, como documentación complementaria del procedimiento de manufactura.

8.6.1 Preparación y simulación del mecanizado en CATIA

La preparación del proceso de manufactura se desarrolló mediante el entorno CAD/CAM de CATIA V5, donde se establecieron las operaciones de corte necesarias para trabajar la geometría seleccionada.

Como se observa en la Figura 28, la simulación permitió visualizar el recorrido de la herramienta durante una operación de desbaste, así como la interacción entre la trayectoria programada y el material de trabajo. Esta etapa proporcionó una representación previa del movimiento de la herramienta antes de ejecutar el proceso de mecanizado.

Los resultados de la simulación sirvieron como referencia para la preparación del programa de control numérico utilizado durante el trabajo con el equipo CNC. La simulación del mecanizado en CATIA permitió preparar y visualizar las trayectorias de herramienta necesarias para fabricar una muestra del perfil NACA 4424 en madera. Este procedimiento se enfocó en la geometría correspondiente a la raíz de la pala, sin incluir la transición NACAT ni el perfil NACA 4421. La preparación del proceso constituyó la base para obtener una pieza destinada a posibles evaluaciones aerodinámicas posteriores.

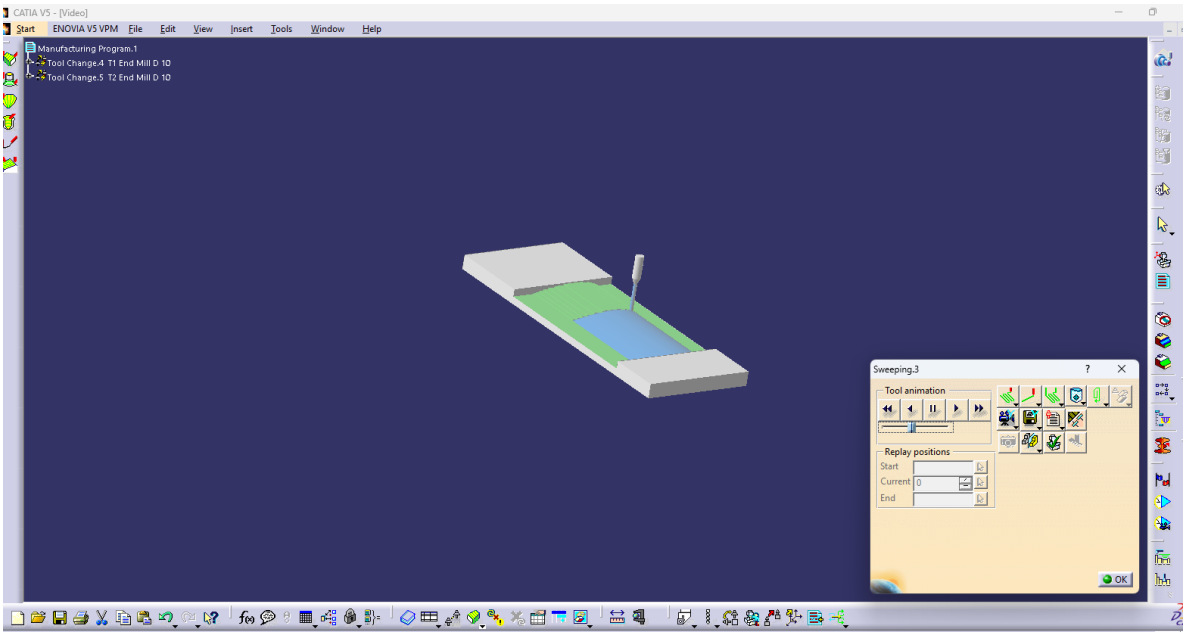


Figura 26:. Simulación de una operación de desbaste de la geometría aerodinámica mediante CATIA V5. Fuente: Propia simulación obtenida de CATIA V5.

8.6.2 Obtención de la geometría mecanizada

Como resultado del proceso de manufactura CNC, se obtuvo una pieza de madera correspondiente al perfil aerodinámico NACA 4424, seleccionado para la región de la raíz de la pala. Su fabricación permitió reproducir físicamente esta geometría mediante las trayectorias de mecanizado preparadas en CATIA.

La Figura 29 presenta la pieza obtenida y permite documentar la reproducción física de la superficie mecanizada. Esta evidencia demuestra la ejecución del proceso bajo las condiciones de fabricación utilizadas; sin embargo, la pieza se desarrolló con la finalidad de disponer de una muestra que pudiera utilizarse en una investigación posterior para evaluar su comportamiento aerodinámico mediante ensayos en un túnel de viento.



Figura 27: Pieza de madera correspondiente al perfil NACA 4424, obtenida mediante mecanizado CNC. Fuente: elaboración propia.

8.7 Discusión integral y contraste de la hipótesis

8.7.1 Relación entre os resultados y los objetivos específicos

Los resultados obtenidos se analizaron de manera conjunta para establecer la relación entre las etapas del diseño y los objetivos planteados. Como se presenta en el Diagrama 1, la investigación permitió caracterizar el recurso eólico, comparar perfiles

aerodinámicos, dimensionar el rotor mediante BEM y desarrollar una geometría tridimensional para su evaluación estructural.

La información meteorológica mostró diferencias entre las velocidades promedio del sitio y la condición nominal utilizada durante el diseño. Por esta razón, los resultados del algoritmo BEM se interpretaron dentro de sus condiciones de cálculo, sin equipararlos con la producción eléctrica real del aerogenerador.

La evaluación de perfiles permitió reconocer diferencias entre sus características aerodinámicas. Posteriormente, la combinación de NACA 4424, NACAT y NACA 4421 se utilizó para desarrollar el modelo geométrico. Esta configuración respondió a las necesidades establecidas para las distintas regiones de la pala y no exclusivamente a la selección del perfil con mayor relación sustentación-arrastre.

El modelo tridimensional permitió continuar con el análisis estructural mediante ANSYS. Los resultados proporcionaron información sobre deformaciones y esfuerzos, aunque su interpretación se encuentra limitada por las propiedades del material y las condiciones numéricas utilizadas.

Finalmente, el mecanizado en madera permitió obtener una representación física de la geometría ensayada. Esta etapa aportó evidencia de su reproducción mediante CNC, pero no representa la validación experimental de una pala completa fabricada en fibra de vidrio.

8.7.2 Contraste de la hipótesis

La hipótesis de investigación planteó que la utilización de perfiles aerodinámicos diferenciados permitiría desarrollar una geometría para un aerogenerador de eje horizontal de 3 kW de potencia nominal objetivo, con características evaluables desde los puntos de vista aerodinámico, estructural y de manufactura.

Los resultados obtenidos proporcionan evidencia favorable para la primera parte de este planteamiento. La evaluación de perfiles permitió seleccionar una combinación de secciones y, mediante el dimensionamiento BEM, se establecieron los parámetros necesarios para construir una geometría tridimensional. Asimismo, el modelo

desarrollado en SolidWorks permitió llevar a cabo una evaluación estructural en ANSYS.

La etapa de manufactura aportó evidencia complementaria mediante la obtención de una pieza mecanizada en madera. Sin embargo, esta comprobación corresponde a la geometría y a las condiciones particulares del proceso realizado, sin extenderse a la fabricación de una pala completa en material compuesto.

En cuanto al desempeño estructural, los valores de deformación y esfuerzo calculados permiten describir la respuesta del modelo.

Por lo anterior, los resultados ofrecen apoyo parcial a la hipótesis: respaldan la posibilidad de desarrollar y evaluar numéricamente una pala con perfiles diferenciados y documentan el mecanizado de una geometría aerodinámica en madera.

9 Conclusiones

La presente investigación permitió desarrollar y evaluar una propuesta de pala para un aerogenerador de eje horizontal de 3 kW de potencia nominal objetivo, integrando el análisis del recurso eólico, la selección de perfiles aerodinámicos, el dimensionamiento geométrico, la evaluación estructural y el mecanizado CNC.

La caracterización del recurso eólico en el área del Tecnológico de Estudios Superiores de Chicoloapan mostró una velocidad media de 2.25 m/s a 10 m de altura y de 3.19 m/s a 50 m. Estos resultados evidencian la importancia de considerar las condiciones locales, especialmente porque la velocidad de diseño de 10.5 m/s es superior al promedio registrado. Por lo tanto, los cálculos nominales no garantizan que el aerogenerador alcance una potencia de 3 kW durante su operación habitual.

La evaluación de cinco perfiles NACA permitió identificar diferencias en sus características aerodinámicas. Aunque el NACA 3412 presentó una relación sustentación-arrastre favorable, la configuración propuesta incorporó el NACA 4424 en la raíz y el NACA 4421 en las regiones exteriores, unidos mediante una sección de transición denominada NACAT. Esta distribución consideró tanto el comportamiento aerodinámico como las características geométricas requeridas en las distintas zonas de la pala.

El dimensionamiento mediante BEM permitió establecer la distribución radial de cuerda y torsión, utilizada posteriormente para construir el modelo tridimensional en SolidWorks. El análisis estructural realizado en ANSYS registró una deformación máxima de 104.27 mm y un esfuerzo principal máximo de 24.569 MPa bajo las condiciones simuladas. En conjunto, los resultados respaldan parcialmente la hipótesis planteada, al demostrar la integración de las etapas de diseño y la posibilidad de mecanizar la geometría estudiada.

Por otra parte, en cuanto a la manufactura, se logró mecanizar en madera una muestra del perfil NACA 4424, correspondiente a la raíz de la pala, mediante trayectorias preparadas en CATIA y ejecutadas en una máquina CNC. Esta etapa permitió comprobar la posibilidad de reproducir físicamente el perfil seleccionado con los

recursos disponibles. La pieza obtenida quedó destinada a posibles estudios posteriores en túnel de viento; sin embargo, su fabricación no constituye una validación experimental del comportamiento aerodinámico ni demuestra la manufacturabilidad de la pala completa.

10 Referencias

[1] J. F. Manwell, J. G. McGowan, y A. L. Rogers, “Wind Energy Explained: Theory, Design and Application”, 2010.

[2] M. R. Islam, R. Saidur, y N. A. Rahim, “Assessment of wind energy potentiality at Kudat and Labuan, Malaysia using Weibull distribution function”, *Energy*, vol. 36, núm. 2, pp. 985–992, 2011, doi: 10.1016/j.energy.2010.12.011.

[3] F. D. . Bianchi, H. . De Battista, y R. J. . Mantz, *Wind turbine control systems : principles, modelling and gain scheduling design*. Springer, 2007.

[4] Rafael Vidal Herrera, “EVALUACIÓN DEL RECURSO EÓLICO EN LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE CIUDAD JUÁREZ”, 2014.

[5] H. K. Versteeg y W. Malalasekera, “An Introduction to Computational Fluid Dynamics Second Edition”. [En línea]. Disponible en: www.pearsoned.co.uk/versteeg

[6] Martin O. L Hansen, “Aerodynamics of Wind Turbines”, 2015.

[7] T. R. Ayodele, A. S. O. Ogunjuyigbe, O. Odigie, y A. A. Jimoh, “On the most suitable sites for wind farm development in Nigeria”, *Data Brief*, vol. 19, pp. 29–41, ago. 2018, doi: 10.1016/j.dib.2018.04.144.

[8] J. Yang, L. Hu, Y. Lei, C. Yang, y W. Liu, “Optimization of wind turbine blade airfoil considering environmental parameters uncertainty under rime conditions”, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 79, p. 107739, mar. 2026, doi: 10.1016/j.csite.2026.107739.

[9] K. Kajiwara y M. Anyoji, “Turbulence Intensity Effects on a Leading-Edge Separation Bubble of Flat Plate Wing at Low-Reynolds Numbers”, *Journal of Flow Control, Measurement & Visualization*, vol. 08, núm. 04, pp. 188–207, 2020, doi: 10.4236/jfcmv.2020.84012.

[10] G. Richmond-Navarro, M. Montenegro-Montero, y C. Otárola, “Revisión de los perfiles aerodinámicos apropiados para turbinas eólicas de eje horizontal y de pequeña escala en zonas boscosas”, *Rev. Lasallista Investig.*, vol. 17, núm. 1, pp. 233–251, 2020, doi: 10.22507/rli.v17n1a22.

[11] M. J. Ganiele *et al.*, “Perfiles de Microaerogeneradores HAWT a Bajo Número de REYNOLDS (Low REYNOLDS Number Airfoils for Small Horizontal Axis Wind Turbine)”, 2021.

[12] S. Rehman, M. Mahbub Alam, L. M. Alhems, y M. Mujahid Rafique, “Horizontal AxisWind Turbine Blade Design Methodologies for Efficiency Enhancement A Review”, el 25 de febrero de 2018, *MDPI AG*. doi: 10.3390/en11030506.

[13] Ing. Gerardo Vidal Pavon, “Modelacion de respuesta aerodinamica para aspas con stall pasivo”, 2019.

[14] Sathyajith Mathew, *Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics*. Scholars Portal, 2019. doi: 3-540-30905-5SpringerBerlinHeidelbergNewYork.

[15] M. Fuster Carrascosa, “PROYECTO PARA EVALUAR LA INFLUENCIA DEL DISEÑO DE LOS ÁLABES Y LOS MATERIALES EMPLEADOS EN EL COMPORTAMIENTO EN SERVICIO DE UN AEROGENERADOR DE BAJA POTENCIA.”, 2025.

[16] Y. Erick *et al.*, “Design and manufacturing of wind turbine blades of low capacity using cad/cam techniques and composite materials”, en *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, 2014, pp. 682–690. doi: 10.1016/j.egypro.2014.10.223.

[17] L. F. Quesada-Bedoya, J. Sandoval-Guerrero, S. Bernal-Del Ro, R. Mejía-Gutiérrez, y G. Osorio-Gómez, “Exploration of bioinspired small wind turbine blade manufacturing alternatives: Defining materials and processes”, *Wind Engineering*, vol. 48, núm. 5, pp. 765–783, oct. 2024, doi: 10.1177/0309524X241229405;WEBSITE:WEBSITE:SAGE;WGROUP:STRING:PUBLICATION.

[18] Tony. Burton, Nick. Jenkins, David. Sharpe, Ervin. Bossanyi, y Michael. Graham, *Wind energy handbook*. John Wiley & Sons, Inc., 2021.

[19] J. N. Sørensen, “General Momentum Theory for Horizontal Axis Wind Turbines”. [En línea]. Disponible en: http://www.springer.com/series/11859

[20] “Fabricacion por CN con CATIA - J.Salguero”.

[21] “NASA POWER Data Access Viewer (DAV)”. Consultado: el 23 de agosto de 2026. [En línea]. Disponible en: https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/?utm_source=chatgpt.com

III. Anexos

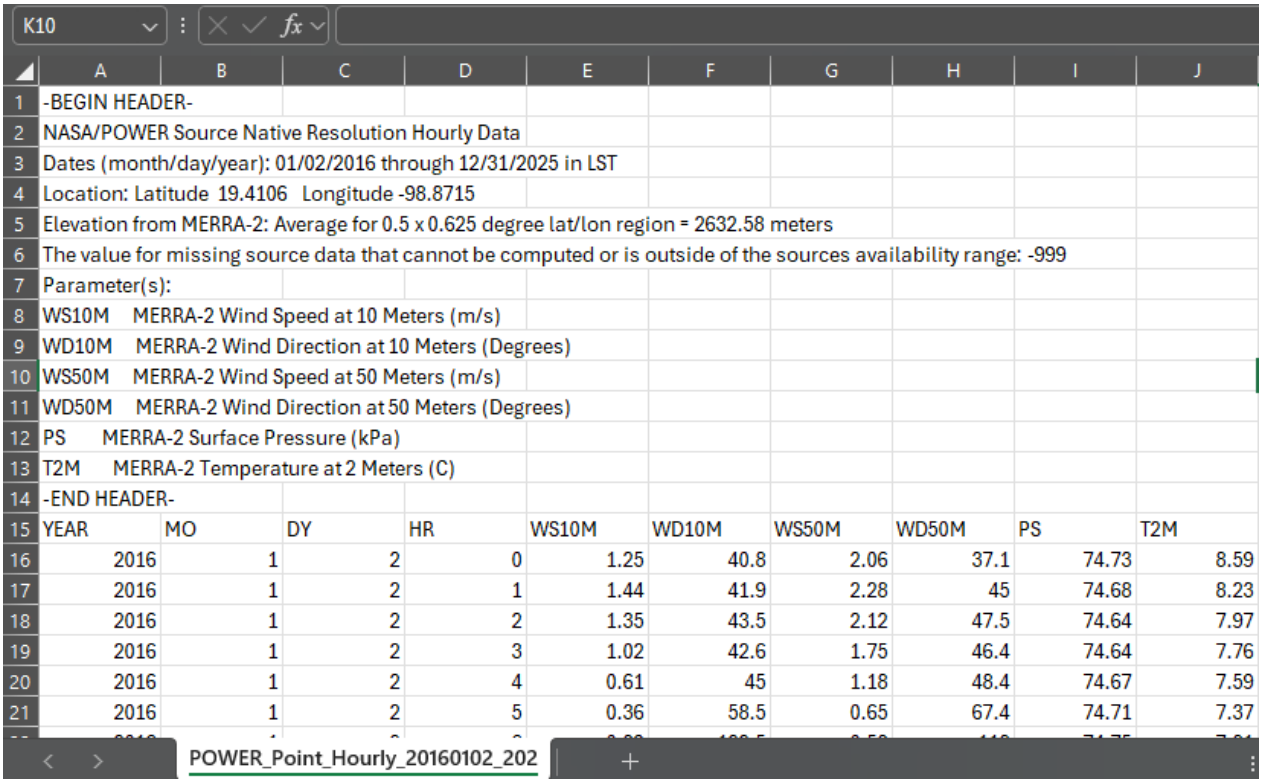
ANEXO A. Base de datos meteorológicos y resultados complementarios de la caracterización del recurso eólico

Tabla A.1. Características de la base de datos meteorológicos utilizada en la investigación.

Característica	Información
Fuente	NASA POWER
Producto meteorológico	Identificar producto exacto y su relación con MERRA-2
Latitud	19.410727° N
Longitud	98.871466° O
Periodo	02/01/2016–31/12/2025
Resolución temporal	Horaria
Registros de la serie	87 648
Variables	Velocidad y dirección a 10 y 50 m; presión y temperatura, según archivo
Referencia temporal	Tiempo solar local (LST)

Fuente: elaboración propia a partir de los metadatos del producto NASA POWER utilizado.

Figura A.1. Vista parcial de la base de datos meteorológicos organizada en Excel.



K10

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	-BEGIN HEADER-									
2	NASA/POWER Source Native Resolution Hourly Data									
3	Dates (month/day/year): 01/02/2016 through 12/31/2025 in LST									
4	Location: Latitude 19.4106 Longitude -98.8715									
5	Elevation from MERRA-2: Average for 0.5 x 0.625 degree lat/lon region = 2632.58 meters									
6	The value for missing source data that cannot be computed or is outside of the sources availability range: -999									
7	Parameter(s):									
8	WS10M MERRA-2 Wind Speed at 10 Meters (m/s)									
9	WD10M MERRA-2 Wind Direction at 10 Meters (Degrees)									
10	WS50M MERRA-2 Wind Speed at 50 Meters (m/s)									
11	WD50M MERRA-2 Wind Direction at 50 Meters (Degrees)									
12	PS MERRA-2 Surface Pressure (kPa)									
13	T2M MERRA-2 Temperature at 2 Meters (C)									
14	-END HEADER-									
15	YEAR	MO	DY	HR	WS10M	WD10M	WS50M	WD50M	PS	T2M
16	2016	1	2	0	1.25	40.8	2.06	37.1	74.73	8.59
17	2016	1	2	1	1.44	41.9	2.28	45	74.68	8.23
18	2016	1	2	2	1.35	43.5	2.12	47.5	74.64	7.97
19	2016	1	2	3	1.02	42.6	1.75	46.4	74.64	7.76
20	2016	1	2	4	0.61	45	1.18	48.4	74.67	7.59
21	2016	1	2	5	0.36	58.5	0.65	67.4	74.71	7.37

POWER_Point_Hourly_20160102_202

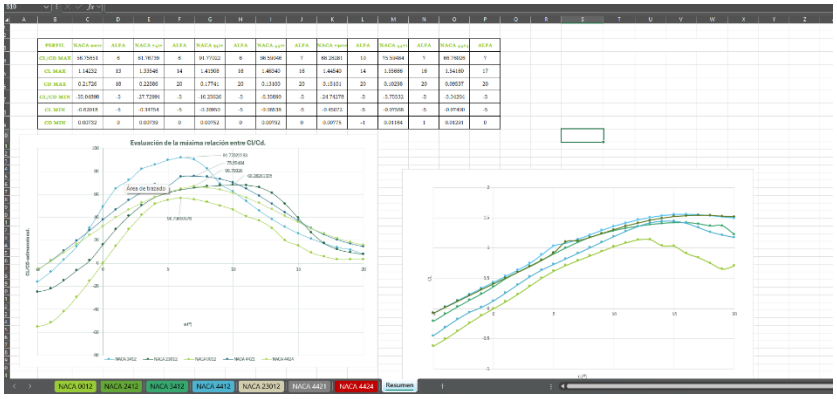
ANEXO B Coordenadas normalizadas de los perfiles aerodinámicos NACA evaluados

Figura B.1. Vista parcial de la base de datos de las coordenadas de los perfiles en Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	NACAS	23012			3412			4421			4424			12	
2		100,000	0.00126		100,000	0.00126		100,000	0.00220		100,000	0.00252		100,000	0.00126
3		0.99748	0.00167		0.99748	0.00187		0.99748	0.00316		0.99748	0.00356		0.99748	0.00161
4		0.99291	0.00241		0.99291	0.00296		0.99291	0.00488		0.99291	0.00544		0.99291	0.00225
5		0.98705	0.00335		0.98705	0.00434		0.98705	0.00707		0.98705	0.00783		0.98705	0.00306
6		0.98019	0.00444		0.98019	0.00595		0.98019	0.00961		0.98019	0.01061		0.98019	0.00401
7		0.97248	0.00566		0.97248	0.00774		0.97248	0.01243		0.97248	0.01370		0.97248	0.00506
8		0.96406	0.00699		0.96406	0.00968		0.96406	0.01549		0.96406	0.01704		0.96406	0.00619
9		0.95499	0.00840		0.95499	0.01174		0.95499	0.01873		0.95499	0.02059		0.95499	0.00740
10		0.94536	0.00988		0.94536	0.01389		0.94536	0.02214		0.94536	0.02431		0.94536	0.00868
11		0.93521	0.01143		0.93521	0.01613		0.93521	0.02567		0.93521	0.02817		0.93521	0.01000
12		0.92461	0.01303		0.92461	0.01843		0.92461	0.02932		0.92461	0.03216		0.92461	0.01137
13		0.91358	0.01468		0.91358	0.02079		0.91358	0.03305		0.91358	0.03624		0.91358	0.01277
14		0.90217	0.01637		0.90217	0.02319		0.90217	0.03684		0.90217	0.04039		0.90217	0.01421
15		0.89041	0.01808		0.89041	0.02562		0.89041	0.04069		0.89041	0.04461		0.89041	0.01566
16		0.87833	0.01983		0.87833	0.02807		0.87833	0.04457		0.87833	0.04886		0.87833	0.01714
17		0.86596	0.02159		0.86596	0.03054		0.86596	0.04848		0.86596	0.05314		0.86596	0.01863
18		0.85332	0.02337		0.85332	0.03301		0.85332	0.05240		0.85332	0.05744		0.85332	0.02013
19		0.84043	0.02517		0.84043	0.03548		0.84043	0.05632		0.84043	0.06173		0.84043	0.02164
20		0.82733	0.02697		0.82733	0.03794		0.82733	0.06023		0.82733	0.06602		0.82733	0.02315
21		0.81401	0.02877		0.81401	0.04038		0.81401	0.06412		0.81401	0.07029		0.81401	0.02467
22		0.80051	0.03058		0.80051	0.04281		0.80051	0.06798		0.80051	0.07453		0.80051	0.02617
23		0.78685	0.03238		0.78685	0.04521		0.78685	0.07181		0.78685	0.07873		0.78685	0.02768
24		0.77303	0.03418		0.77303	0.04757		0.77303	0.07559		0.77303	0.08288		0.77303	0.02917
25		0.75907	0.03597		0.75907	0.04991		0.75907	0.07932		0.75907	0.08698		0.75907	0.03065
26		0.74500	0.03775		0.74500	0.05220		0.74500	0.08299		0.74500	0.09102		0.74500	0.03212
27		0.73082	0.03952		0.73082	0.05445		0.73082	0.08660		0.73082	0.09499		0.73082	0.03357
28		0.71655	0.04127		0.71655	0.05666		0.71655	0.09013		0.71655	0.09889		0.71655	0.03501
29		0.70220	0.04300		0.70220	0.05881		0.70220	0.09360		0.70220	0.10270		0.70220	0.03642
30		0.68778	0.04471		0.68778	0.06092		0.68778	0.09698		0.68778	0.10643		0.68778	0.03782
31		0.67331	0.04640		0.67331	0.06296		0.67331	0.10028		0.67331	0.11007		0.67331	0.03919
32		0.65879	0.04806		0.65879	0.06495		0.65879	0.10348		0.65879	0.11361		0.65879	0.04053
33		0.64425	0.04970		0.64425	0.06687		0.64425	0.10659		0.64425	0.11705		0.64425	0.04184
34		0.62968	0.05130		0.62968	0.06873		0.62968	0.10961		0.62968	0.12039		0.62968	0.04312
35		0.61510	0.05287		0.61510	0.07052		0.61510	0.11251		0.61510	0.12361		0.61510	0.04437
36		0.60052	0.05441		0.60052	0.07224		0.60052	0.11532		0.60052	0.12671		0.60052	0.04559
37		0.58595	0.05591		0.58595	0.07389		0.58595	0.11801		0.58595	0.12970		0.58595	0.04677

ANEXO C. Polares aerodinámicas y resultados de la evaluación multicriterio de perfiles

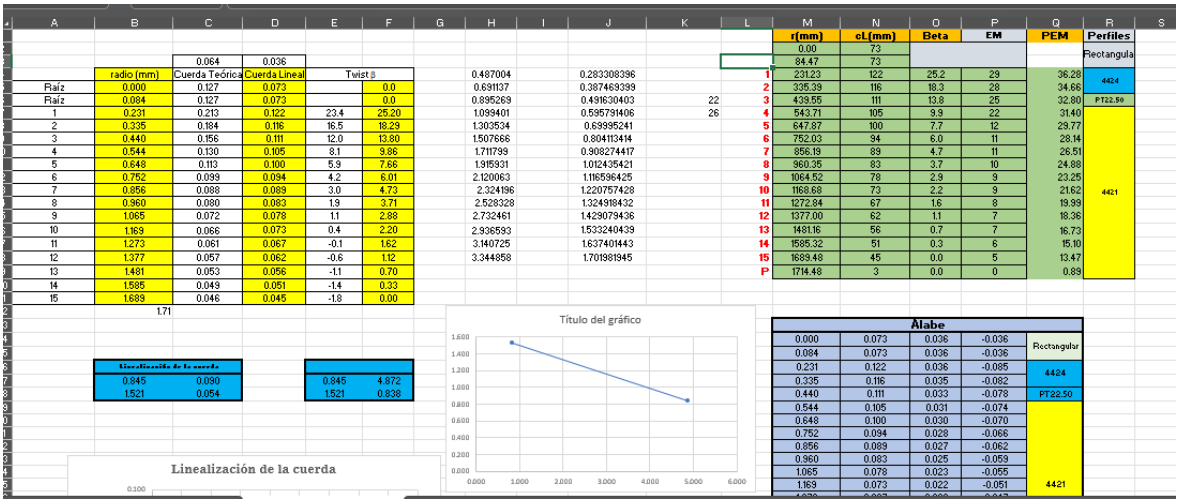
Figura C.1. Vista parcial de la base de datos de los polares de los perfiles en Excel.



Resultados de la evaluación multicriterio de los cinco perfiles aerodinámicos

ANEXO D. Parámetros de entrada y resultados del dimensionamiento aerodinámico mediante BEM

Figura D.1. Resultados de BEM para el álabe en Excel.



	radio (mm)	Cuerda Teórica	Cuerda Lineal	Twist β	
		0.064	0.036		
Raíz	0.000	0.127	0.073		0.0
Raíz	0.084	0.127	0.073		0.0
1	0.231	0.213	0.122	23.4	25.20
2	0.335	0.184	0.116	16.5	18.29
3	0.440	0.156	0.111	12.0	12.80
4	0.544	0.130	0.105	8.1	9.86
5	0.648	0.113	0.100	5.9	7.66
6	0.752	0.099	0.094	4.2	6.01
7	0.856	0.088	0.089	3.0	4.73
8	0.960	0.080	0.083	1.9	3.71
9	1.065	0.072	0.078	1.1	2.88
10	1.169	0.066	0.073	0.4	2.20
11	1.273	0.061	0.067	-0.1	1.62
12	1.377	0.057	0.062	-0.6	1.12
13	1.481	0.053	0.056	-1.1	0.70
14	1.585	0.049	0.051	-1.4	0.33
15	1.689	0.046	0.045	-1.8	0.00

0.487004	0.283308396		1	231.23	122	25.2	29
0.691137	0.387469399		2	335.39	116	18.3	28
0.895269	0.491630403	22	3	439.55	111	13.8	25
1.099401	0.595791406	26	4	543.71	105	9.9	22
1.303534	0.69995241		5	647.87	100	7.7	12
1.507666	0.804113414		6	752.03	94	6.0	11
1.711799	0.908274417		7	856.19	89	4.7	11
1.915931	1.012435421		8	960.35	83	3.7	10
2.120063	1.116596425		9	1064.52	78	2.9	9
2.324196	1.220757428		10	1168.68	73	2.2	9
2.528328	1.324918432		11	1272.84	67	1.6	8
2.732461	1.429079436		12	1377.00	62	1.1	7
2.936593	1.533240439		13	1481.16	56	0.7	7
3.140725	1.637401443		14	1585.32	51	0.3	6
3.344858	1.701981945		15	1689.48	45	0.0	5
			P	1714.48	3	0.0	0

r(mm)	cL(mm)	Beta	EM	PEM	Perfiles
0.00	73				Rectangula
84.47	73				
				36.28	4424
				34.66	
				32.80	PT22.50
				31.40	
				29.77	
				28.14	
				26.51	
				24.88	
				23.25	
				21.62	4421
				19.99	
				18.36	
				16.73	
				15.10	
				13.47	
				0.89	

Alabe				
0.000	0.073	0.036	-0.036	Rectangular
0.084	0.073	0.036	-0.036	
0.231	0.122	0.036	-0.085	4424
0.335	0.116	0.035	-0.082	
0.440	0.111	0.033	-0.078	PT22.50
0.544	0.105	0.031	-0.074	
0.648	0.100	0.030	-0.070	
0.752	0.094	0.028	-0.066	
0.856	0.089	0.027	-0.062	
0.960	0.083	0.025	-0.059	
1.065	0.078	0.023	-0.055	
1.169	0.073	0.022	-0.051	4421

0.845	0.090	0.845	4.872
1.521	0.054	1.521	0.838

Figura. D 2. Resultados geométricos completos de las estaciones radiales del álabe en Excel.

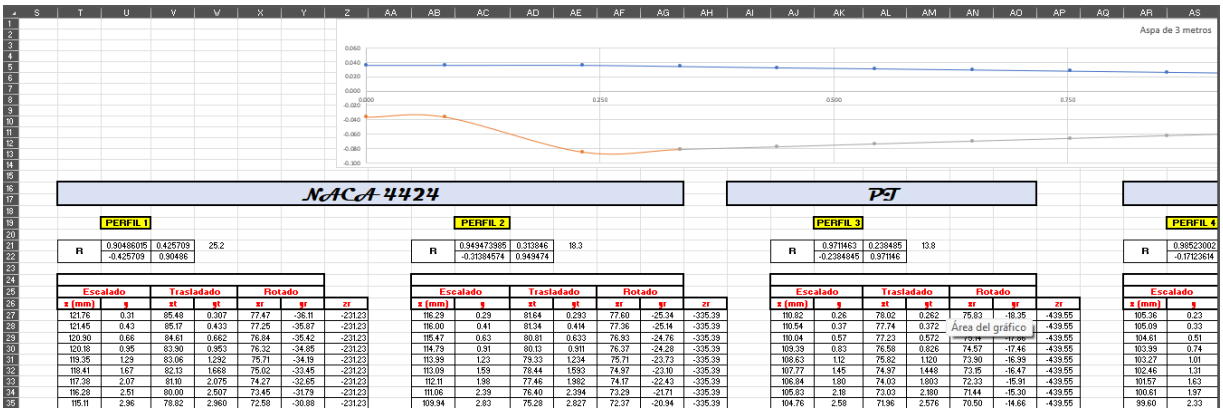
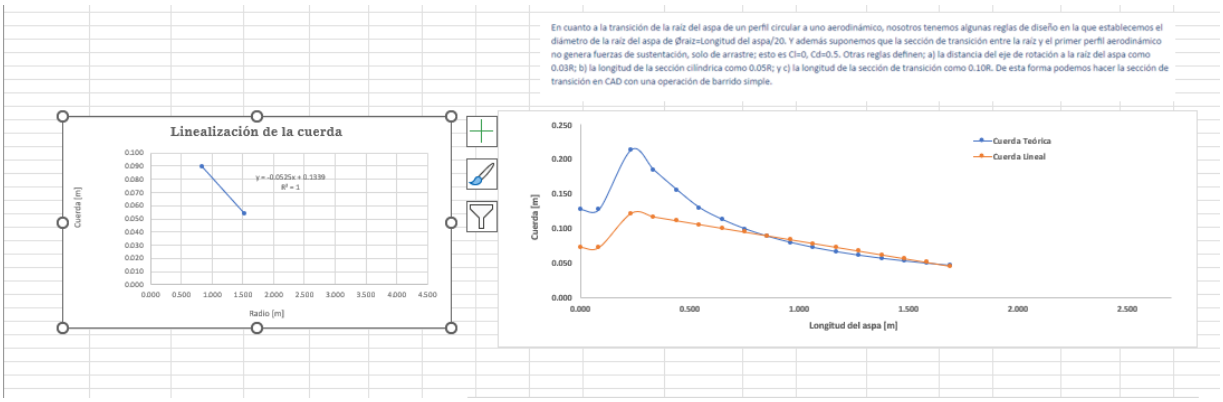


Figura C.3. Resultados de operación aerodinámica por estación mediante BEM en Excel.



ANEXO E. Documentación geométrica del álabe desarrollado en SolidWorks

Figura E.1. Perfiles en SolidWorks con los valores obtenidos del BEM.

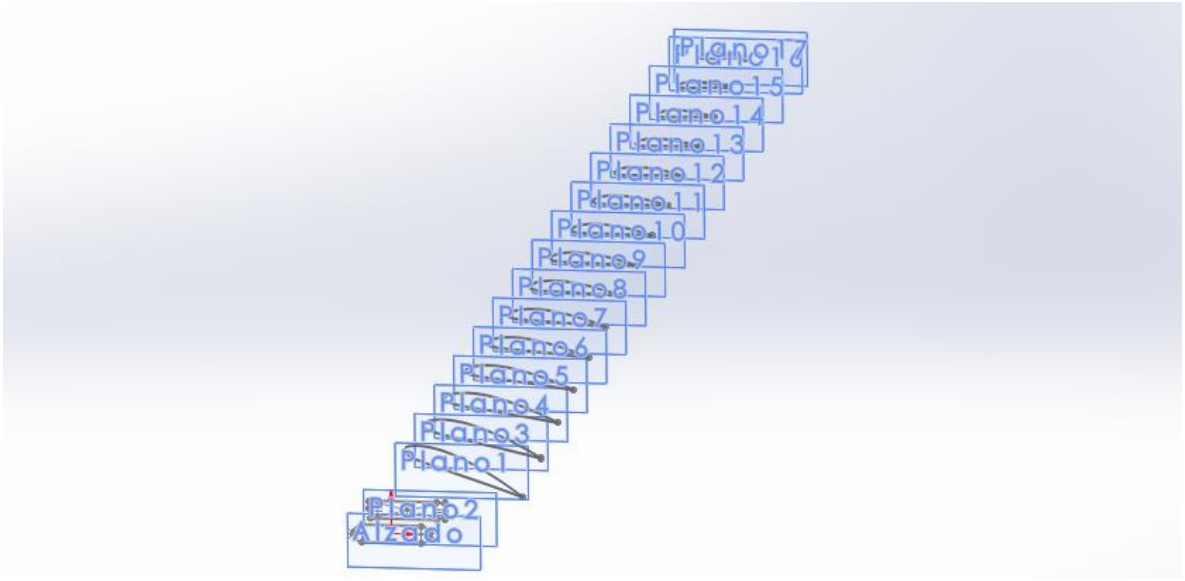


Figura E.2. Perfiles en SolidWorks unidos con curvas.

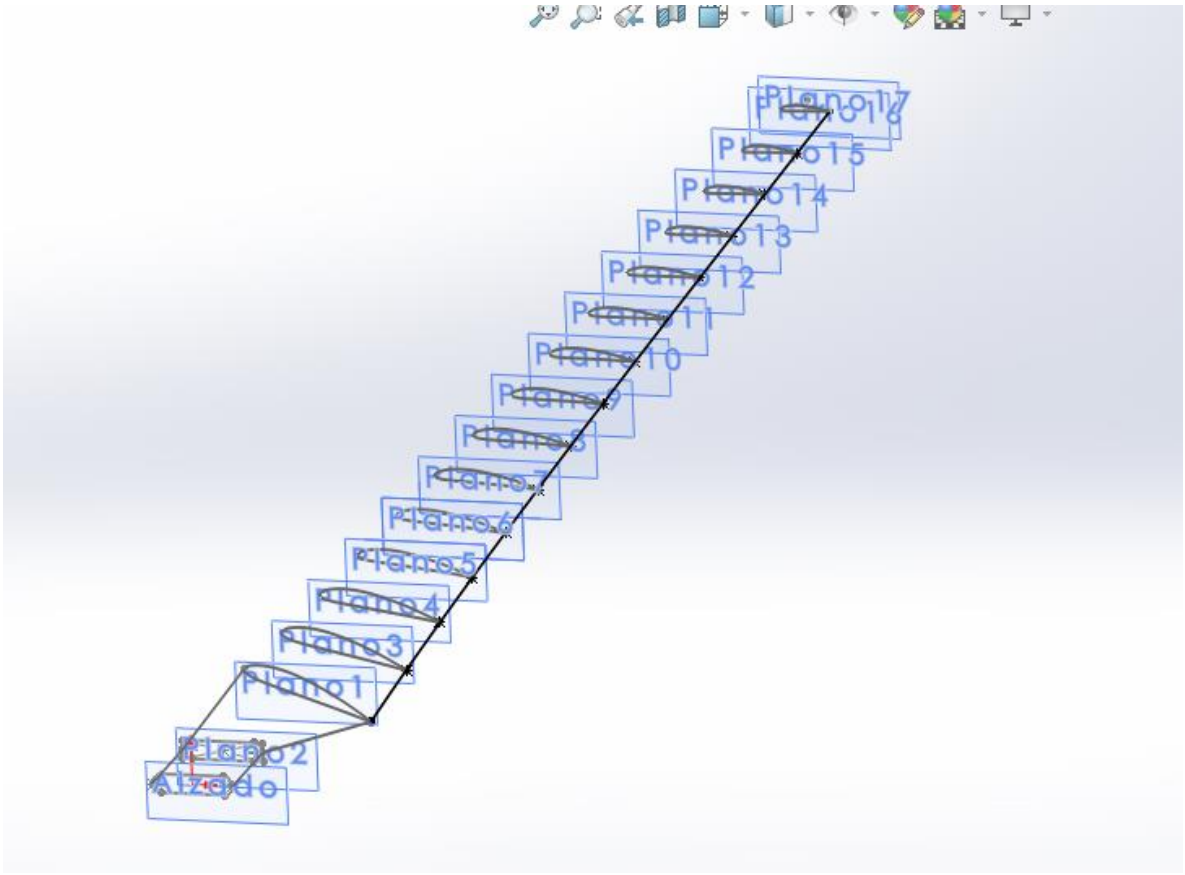


Figura E.3. Perfiles en SolidWorks ajuste de la curvatura del perfil de raíz y el perfil de transición.

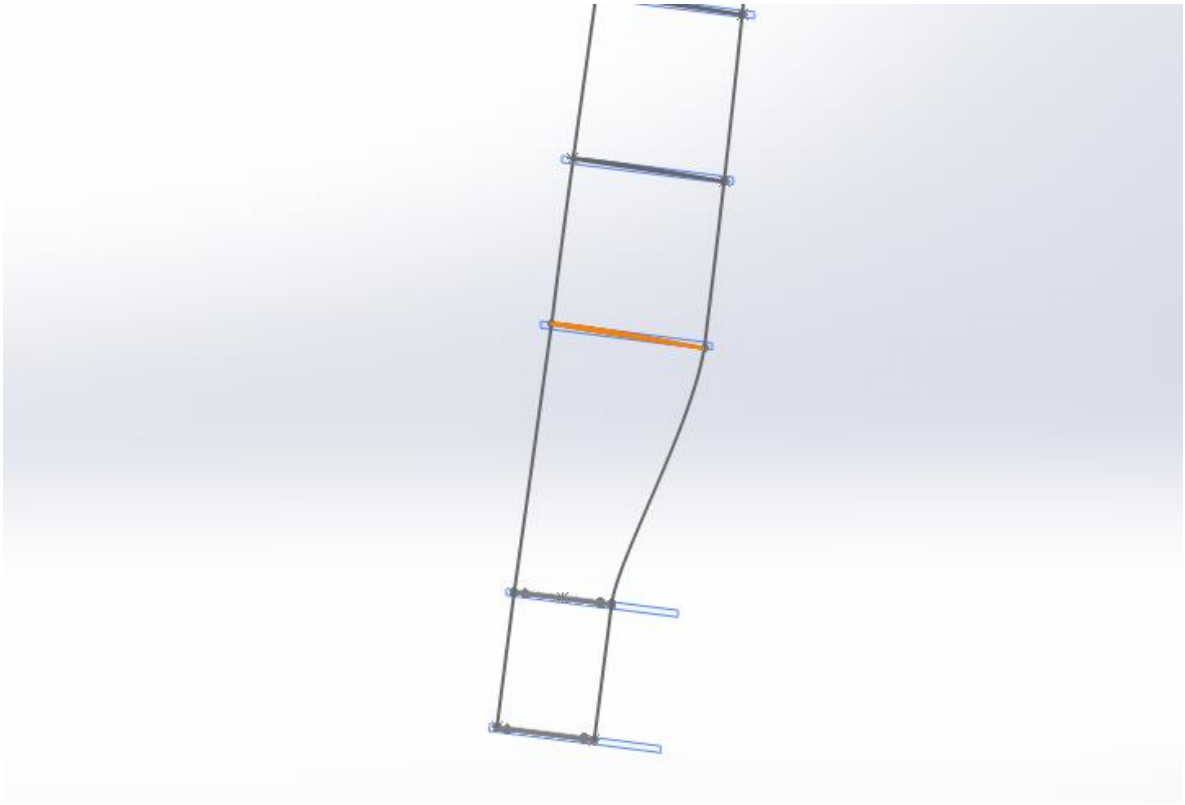


Figura E.4. Perfiles en SolidWorks ajuste de la punta del perfil.

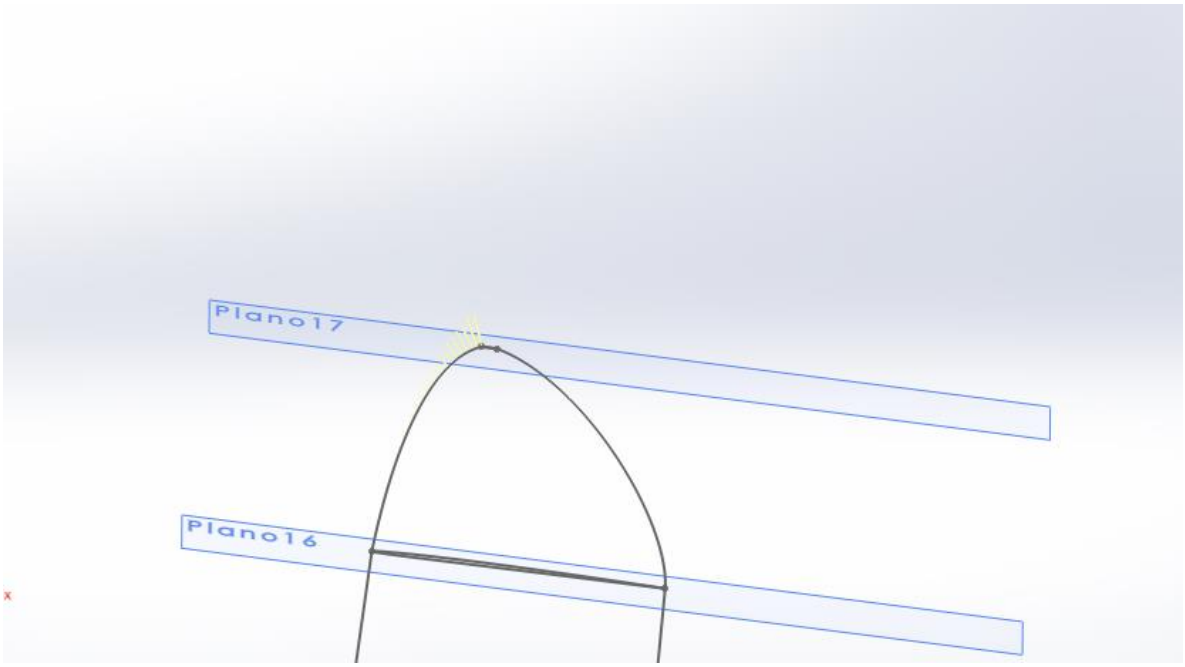


Figura E.5. Perfiles en SolidWorks uso de la herramienta de recubrimiento.

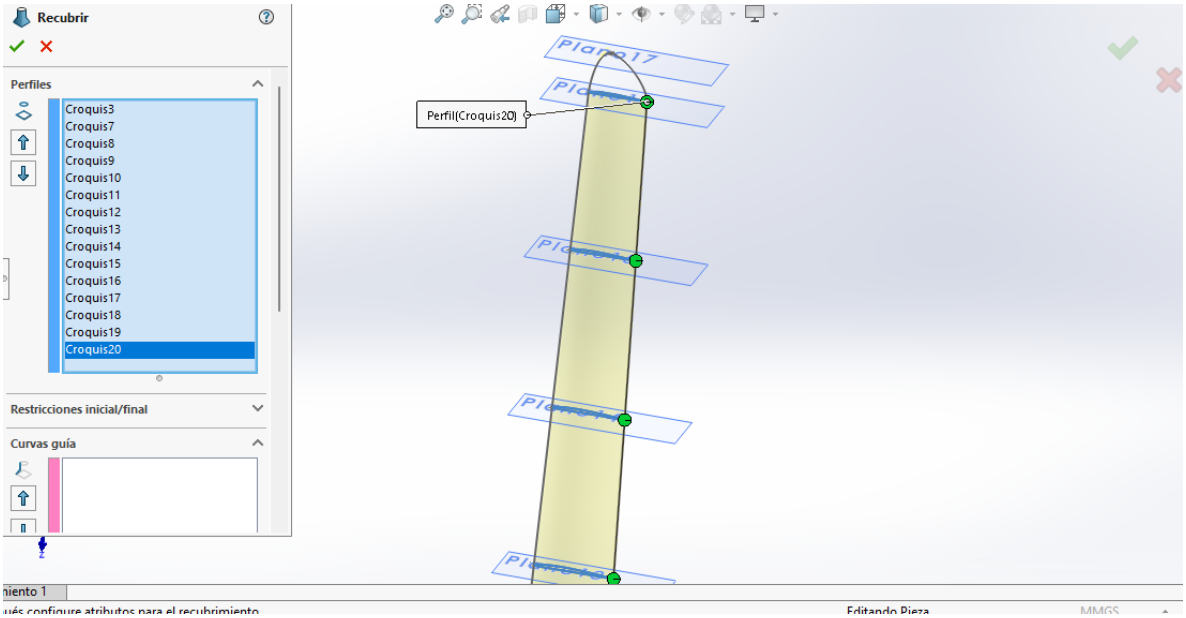


Figura E.6. Perfiles en SolidWorks división de secciones.

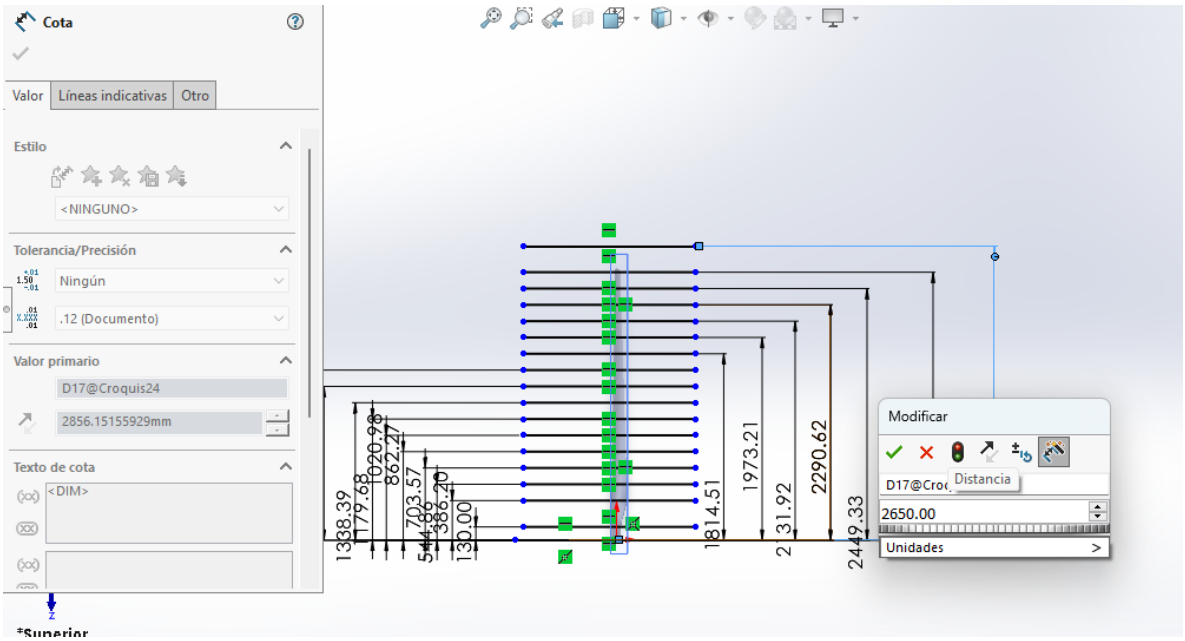
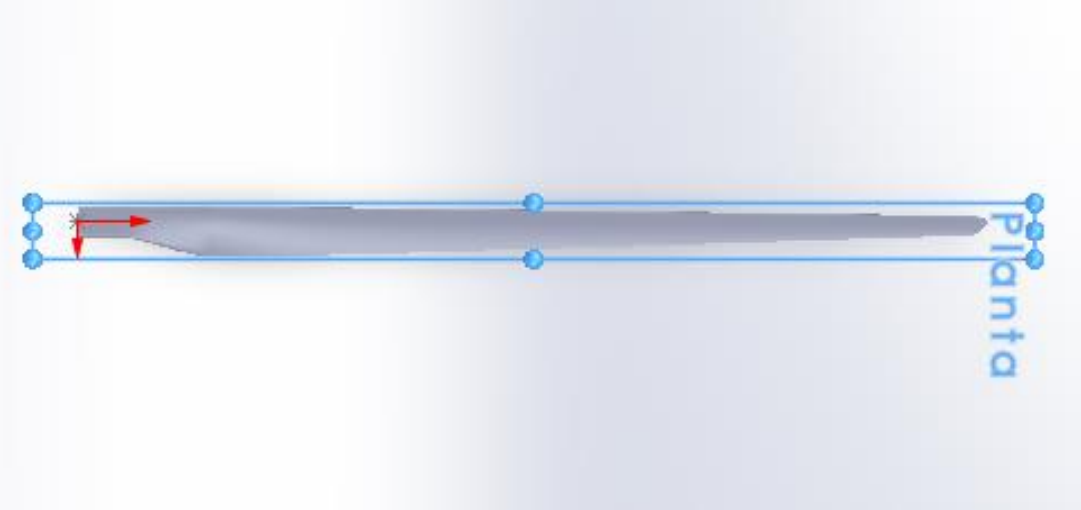


Figura E.7. Pala en SolidWorks ajuste de la base de la raíz.



ANEXO F. Simulación del mecanizado y programas de control numérico utilizados en CNC

Figura F.1. Resultados del mecanizado CNC

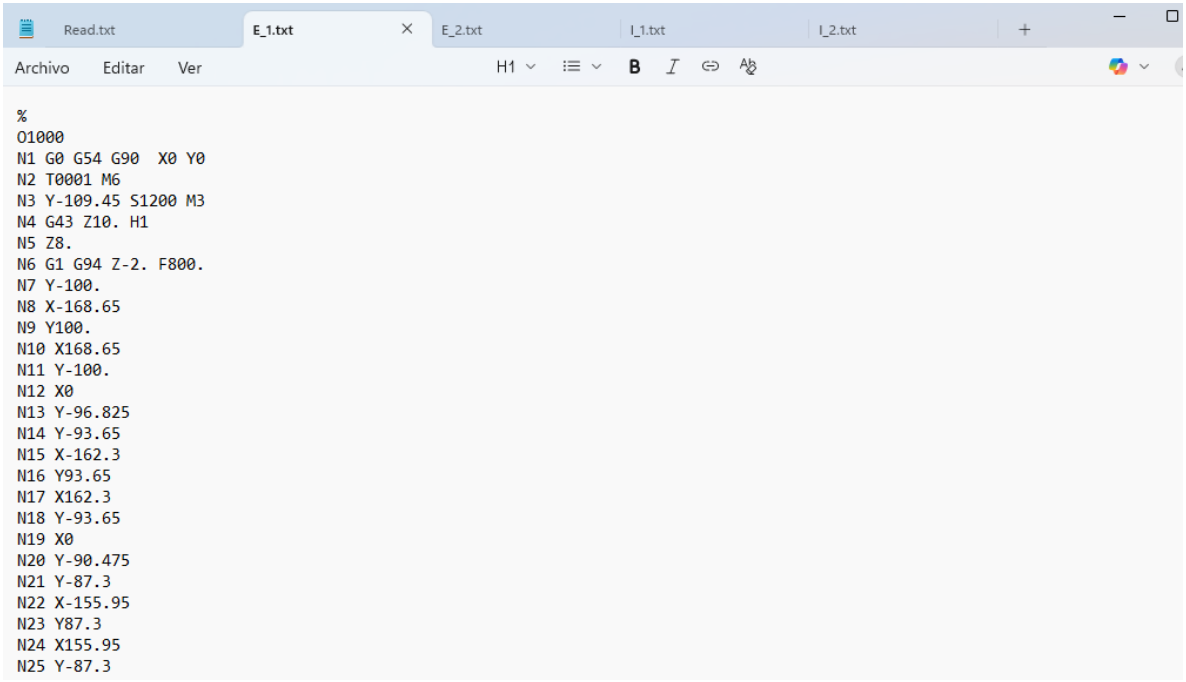


Figura F.2. Resultados del mecanizado CNC

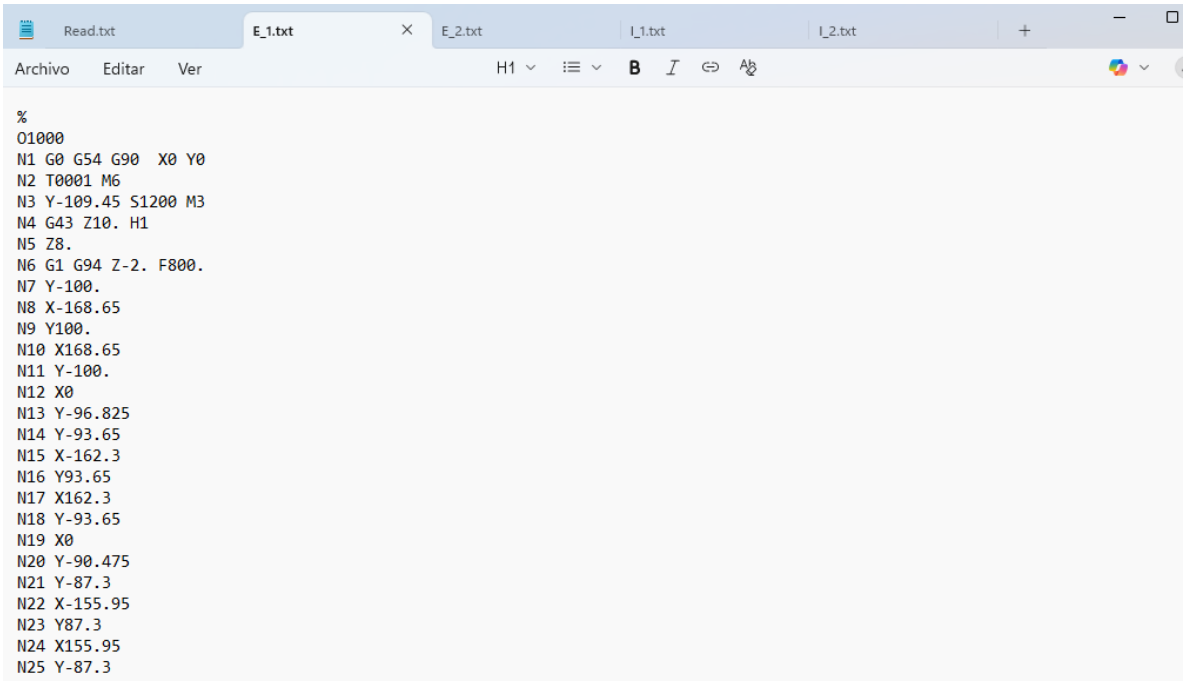


Figura F.3. Resultados del mecanizado CNC

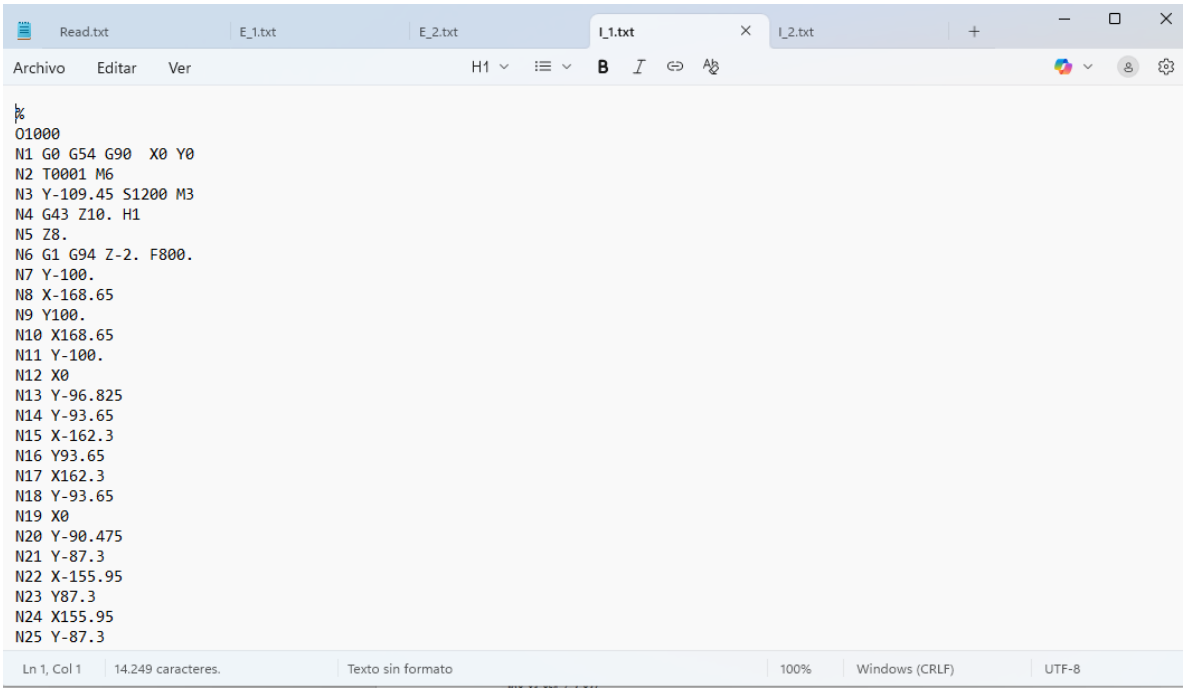


Figura F.4. Resultados del mecanizado CNC

